

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
INFORME FINAL**

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA
DETERMINACIÓN DE CAUDAL AMBIENTAL EN
UNA CUENCA PILOTO EN EL MARCO DEL
PROCESO DE OTORGAMIENTO DE
CONCESIONES DE AGUA
(DOCUMENTO 1)**

Karolina Villagra Mendoza, Ingeniería Agrícola (Coordinadora)
Isabel Guzmán Arias
Fernando Watson
Pablo Quirós

Cartago, Diciembre 2018

Código y Título del proyecto

Código 1421011

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA DETERMINACIÓN DE
CAUDAL AMBIENTAL EN UNA CUENCA PILOTO EN EL
MARCO DEL PROCESO DE OTORGAMIENTO DE
CONCESIONES DE AGUA.**

Autores y direcciones

Karolina Villagra Mendoza, Ingeniería Agrícola (Coordinadora), kvillagra@tec.ac.cr

Isabel Guzmán Arias, iguzman@tec.ac.cr

Fernando Watson, fwatson@tec.ac.cr

Pablo Quirós (Investigador contratado)

Tabla de Contenidos

Resumen	5
1. Introducción	6
2. Marco Teórico	8
2.1 Tipos de enfoques de cálculo de caudal ambiental	11
2.1.1 Enfoque Hidrológico	11
2.1.2 Enfoque Hidráulico.....	15
2.1.3 Enfoque Hidrobiológico o de Simulación del hábitat	17
2.1.4 Enfoque Holístico	21
3. Metodología	25
3.1 OE.1: Determinación el comportamiento hidrológico de la cuenca	26
3.1.1 Selección de la cuenca y caracterización hidrológica	26
3.1.2 Análisis temporal de clima y caudales en el corto y largo plazo.....	27
3.1.3 Identificación del uso del agua en función de las actividades socioeconómicas en la zona de estudio	29
3.1.4 Descripción biótica de la zona de estudio	30
3.2 O.E.2: Valoración de diferentes metodologías para la determinación de caudal ambiental en otros países.	30
3.3 O.E.3: Evaluación de la metodología para una cuenca piloto.	31
3.3.1 Modelo HBV light (Seibert, 2005).....	33
4. Resultados y Discusión	44
4.1 Fisiografía de la cuenca	44
4.2 Condición de la biota del cauce	46
4.3 Método hidrológico para la determinación del caudal ambiental.....	49
4.4 Análisis del régimen fluvial del río Birrís y determinación del caudal ambiental por medio del método de índices de curvas de duración	50
5. Conclusiones y recomendaciones.....	55
6. Agradecimientos.....	55
Referencias	56
Anexos	58
Anexo 1: Convenios TEC-MINAE y TEC-JASEC	58

Anexo 2: Plan de trabajo con la Dirección de Agua.....	59
Anexo 3: Logística del primer taller de validación: agenda, presentación y asistencia ...	60
Anexo 4: Propuesta metodológica de la Comisión de Caudal Ambiental.....	61
Anexo 5: Informes de los estudios biológicos de los indicadores de la cuenca del río Birrís	62
Anexo 6: Imágenes de las características de la cuenca del río Birrís	63

Resumen

El proyecto propuesto sobre caudal ambiental responde a una necesidad presente en el proceso de otorgamiento de concesiones de agua que se lleva a cabo en Costa Rica a cargo de la Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía. En Costa Rica el caudal ambiental se calcula como un 10% del aforo caudal medio del río. Este porcentaje ha carecido de fundamento científico en relación con las condiciones fluviales aptas para preservar los ecosistemas presentes en los cauces. Las concesiones de agua para los diferentes usos han provocado un impacto ambiental que se ve reflejado en las condiciones de disponibilidad del recurso hídrico en algunos puntos vulnerables del país, así como en las condiciones fisicoquímicas y ecológicas de los cauces. En el caso del río Birrís, se concede un 20% del caudal para uso consuntivo como producción agrícola, humano y riego, y el restante se utiliza para la generación hidroeléctrica. Debido a la baja calidad de sus aguas (en términos de contaminación fecal, agroquímicos y por sedimentos) a la fecha no existen especies indicadoras lo que imposibilita el uso de enfoques que tomen en cuenta los ecosistemas para generar curvas de preferencia ya que los estudios biológicos concluyeron que no existen indicadores de caudal en el río Birrís. Por esta razón, el presente trabajo utilizó un enfoque hidrológico para determinar el caudal ambiental del río Birrís usando la metodología de curva de duración de caudales, sin tomar en consideración los ecosistemas. Dicha metodología se basó en el análisis de series de datos de clima obtenidas por 10 años y series de caudales diarios con un periodo de tres años.

Palabras clave

Birrís, Caudal ambiental, Caudal mínimo, Caudal máximo, Concesión, Hidrológico

1. Introducción

La determinación del caudal ambiental es de mucha importancia en el proceso de otorgamiento de concesiones debido a que el medio ambiente es el único usuario del agua que no puede poner de manifiesto, ante el ente correspondiente, sus necesidades hídricas para sobrevivir. En un país con las características de Costa Rica, el cálculo de caudal ambiental está sujeto a la diversidad de usos de la tierra en las diferentes cuencas. Estos usos por lo general se distribuyen en áreas relativamente pequeñas, con necesidades de agua específicas, haciendo que la gestión del agua y el otorgamiento de concesiones se vuelvan un proceso complejo.

Costa Rica posee 51.100 km² de área y contiene 34 cuencas nacionales distribuidas en la vertiente del Caribe que cubre el 46,4% de la superficie terrestre del país y la vertiente del Pacífico que corresponde al 53,6%. El promedio anual de agua en todo el país, tomando como referencia el período 1970-2002, fue de 3.297 mm de precipitación, 2.215 mm de escorrentía y 996 mm de evapotranspiración. El suministro potencial de agua para Costa Rica se estima en 113 km³ de escorrentía y la disponibilidad de agua per cápita estimada fue de 26.221 m³/persona/año en el año 2005. El volumen nacional de fuentes subterráneas que puede usarse se estima en 11 km³ de agua, dando como resultado un flujo sostenible de 350 m³/s (Guzmán-Arias y Calvo-Alvarado, 2013).

La extracción de agua para diversos usos se estimó en el 2005, en 22 km³ o el 20% del volumen disponible de agua (ver Cuadro 1). El uso del agua para la generación de energía representó el 72%, seguido de la agricultura con 21,2%. El consumo humano, el turismo, la industria y la agroindustria representaron el 6,8% de las extracciones totales y 88% de este volumen proviene de fuentes subterráneas, no existen registros del porcentaje destinado a caudal ambiental, haciendo evidente la importancia estratégica de contar con una metodología para el cálculo del caudal ambiental como el primer criterio a considerar dentro del proceso de otorgamiento de concesiones. Algunas proyecciones de uso del agua para el año 2020 se muestran en el Cuadro 1, se estima que para todos los usos llegará a 37,9 km³ de agua, equivalentes a más del 33% de la disponibilidad total de los recursos hídricos del país (Guzmán-Arias y Calvo-Alvarado, 2013).

Cuadro 1. Utilización del agua en Costa Rica para los años 2005 y 2020.

Sector	2005			2020			Incremento
	m ³ /s	km ³	%	m ³ /s	km ³	%	%
Generación geotérmica	0,21	0,01	0,03	2,25	0,07	0,03	600,00
Turismo	3,49	0,11	0,50	7,93	0,25	0,49	127,27
Industria	9,51	0,30	1,37	18,07	0,57	1,33	90,00
Agroindustria	15,85	0,50	2,28	18,07	0,57	2,22	14,00
Consumo humano	18,70	0,59	2,68	22,73	0,72	2,62	22,03
Riego	147,75	4,66	21,21	187,91	5,93	20,68	27,25
Hidroelectricidad	501,00	15,80	71,93	944,00	29,77	72,64	88,42
Total	696,51	21,97	100,00	1200,97	37,87	100,00	72,37

Nota 2005: Generación geotérmica de 150 GWh, consumo humano estimado para 4.309.400 habitantes, riego para 103.000 ha y generación hidroeléctrica de 1.408 MW.

Nota 2020: La generación geotérmica de 1.600 GWh, consumo humano estimado para 5.237.700 habitantes, riego para 131.000 ha y generación hidroeléctrica de 2.698 MW

Ante el acelerado incremento en la demanda de agua para los diferentes usos, se convierte en una necesidad urgente contar con un proceso de otorgamiento de concesiones adecuado a la realidad y que contemple en primera instancia los requerimientos ambientales de agua para garantizar la actividad biológica de las fuentes. La situación se agrava ante el problema que enfrenta en general la gestión de los recursos hídricos atribuido a la legislación de aguas desactualizada y el hecho de que no existe una sola institución con responsabilidad plena en la programación y gestión de los recursos hídricos. No obstante, la Dirección de Agua de Costa Rica es el ente encargado de valorar la viabilidad de las concesiones para todos los usos del agua, y es donde se están llevando a cabo los esfuerzos en conjunto con la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica de contar con un modelo de otorgamiento de concesiones más tecnificado, considerando las necesidades de caudal ambiental y con un sustento en estudios científicos que le den validez a la toma de decisiones.

El presente estudio tiene los siguientes objetivos:

Objetivo General: Proponer y evaluar una metodología de caudal ambiental dentro de una cuenca piloto en el marco del otorgamiento de concesiones de agua.

Objetivos Específicos:

1. Determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca.
2. Valorar diferentes metodologías para la determinación de caudal ambiental en otros países.
3. Evaluar la metodología para una cuenca piloto.

2. Marco Teórico

El caudal ambiental es aquel que mantiene el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial del cauce de un río en condiciones naturales, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural de los ecosistemas vinculados a la fuente de agua y las funciones ambientales tales como purificación de aguas, amortiguación de extremos hidrológicos, recreación, pesca, entre otros (Castro, et.al. 2010). La Declaración de Brisbane 2007 define al caudal ambiental como la cantidad, periodicidad y calidad del cauce de un río requerido para sostener los ecosistemas de las aguas dulces, estuarios y las vidas humanas que dependen de estos ecosistemas.

El uso de metodologías para evaluar el caudal ambiental data desde finales de los años 40s en Estados Unidos. Y en gran parte del resto del mundo se fueron adoptando estas evaluaciones hasta inicios de los años 80s. Incluso en muchas partes del mundo todavía no se tienen regulaciones aptas para mantener las actividades y los ecosistemas bajo un modelo sustentable de mantenimiento (Arthington et al., 2004). Los métodos que existen para hacer la valoración y contabilización de caudal ambiental son muy variados. Se han identificado cuatro grupos de enfoques básicos ampliamente reconocidos: hidrológico, de valoración hidráulica, de simulación de hábitat y el método holístico (Ver Figura 1).

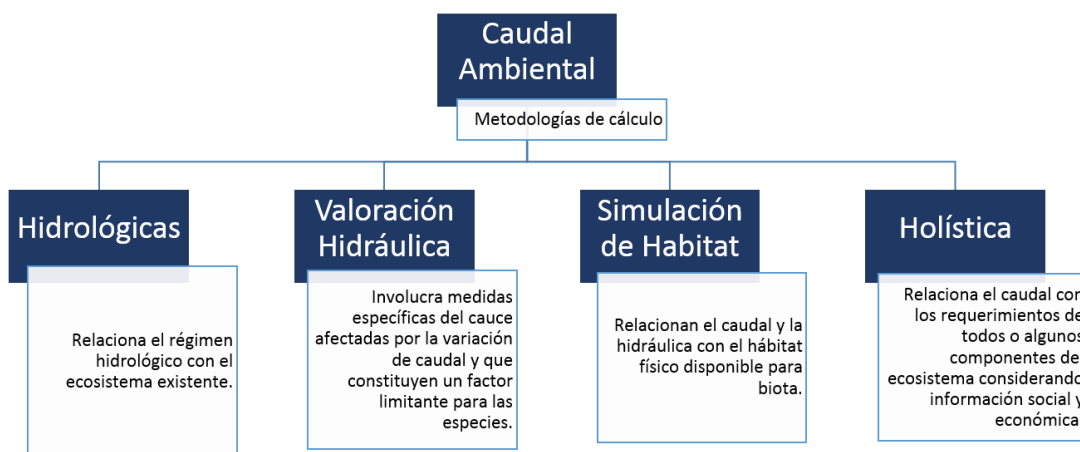


Figura 1. Tipos de enfoques para el cálculo de caudal ambiental

Existen más de 200 metodologías (distribuidas en los cuatro enfoques) usadas en más de 50 países alrededor del mundo (Tharme, 2003). Entre estas, las más utilizadas corresponden a las metodologías hidrológicas, a pesar de que algunos autores no las recomiendan por no incluir la variable de hábitat o especies (Figura 2).

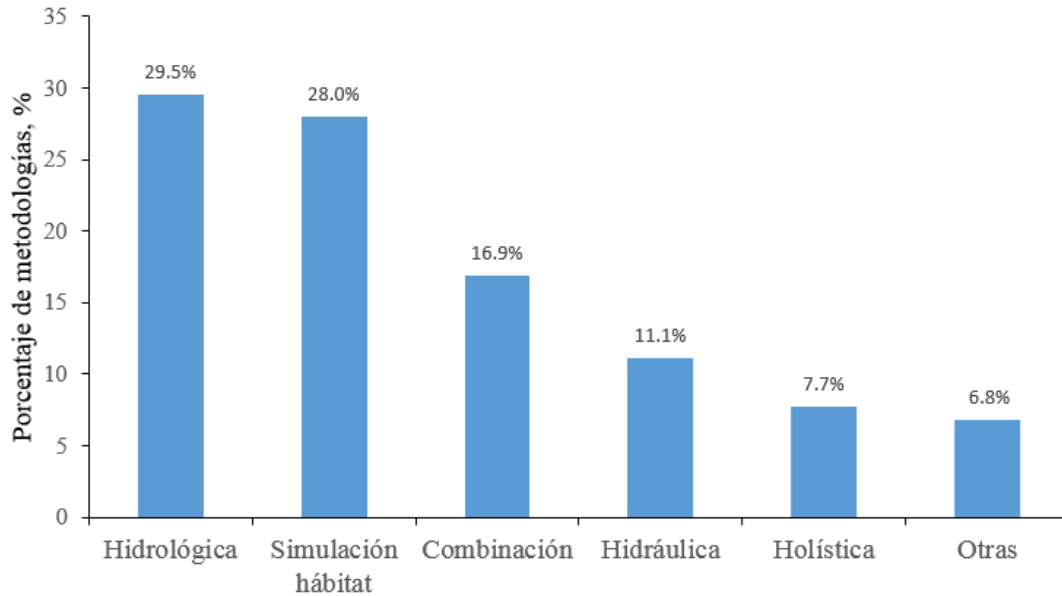


Figura 2. Distribución del uso de las metodologías a nivel mundial (Adaptado de Tharme (2003)).

Así como existe gran variedad de metodologías, también existen diferentes niveles de avance en la aplicación de ellas. Hay países que han logrado grandes avances en el tema, otros que se encuentran en etapa de estudio para desarrollar el método más adecuado y otros que aún no consideran la importancia de establecer las necesidades de caudal ambiental. En México, Argentina, Chile, Colombia y otros países de América Latina existe una tendencia más fuerte a reconocer el recurso agua como un asunto estratégico y de seguridad nacional, actualmente se ha convertido en elemento central de la política ambiental, y más aun, en un factor clave de la política de desarrollo social y de la política económica (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, 2012). Su disponibilidad condiciona la posibilidad de desarrollo de algunas regiones del país, su calidad es factor determinante para la salud y bienestar de la población y su sostenibilidad depende de la gestión adecuada considerando el respeto por la cuota de caudal ambiental. En países como Estados Unidos, Canadá, la Unión Europea, Chile y Brasil, entre otros, existe una ley que hace referencia al caudal ambiental, y que consiste en considerar en los planes de desarrollo la cantidad de agua requerida por los ecosistemas naturales para mantenerse como fuentes sostenibles de ese recurso (Bunge, 2008). Sin embargo, diversos autores han criticado la efectividad de este instrumento por resultar en un esfuerzo que solo conserva un caudal mínimo que en general, no toma en cuenta los periodos de crecidas y bajadas del caudal natural y que es insuficiente para permitir la sostenibilidad del funcionamiento de los ecosistemas. En Costa Rica se han trabajado algunos estudios como: “Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: determinación inicial para el Rio Tempisque” de la Organización de Estudios Tropicales y la UICN bajo un enfoque más académico de simulación de hábitat. La Metodología “RANA -

ICE” desarrollada por el Instituto Costarricense de Electricidad bajo el concepto de método híbrido que combina los mejores métodos existentes y que toma en cuenta los aspectos hidrológicos, ecológicos y socioeconómicos. Sin embargo, ambas metodologías, a pesar de estar muy bien desarrolladas, no cumplen con el requerimiento económico y de practicidad para su implementación en la toma de decisiones inherentes al proceso de otorgamiento de concesiones de agua por parte de la Dirección de Agua. La resultante de esta carencia, es la alianza estratégica entre el Tecnológico de Costa Rica y la Dirección de Agua para encontrar una metodología, para la determinación del cálculo de caudal ambiental integrado al manejo sostenible de la cuenca, que pueda ser utilizada de manera práctica para la atención de solicitudes de concesión de agua en Costa Rica.

Para la aplicación de estas metodologías Consuegra Martínez (2013) resume la relación entre los principales componentes hidráulicos, hidrológicos, biológicos y sociales para determinar el caudal ambiental. La correcta identificación de los componentes involucrados contribuye a la selección de la metodología a utilizar (Figura 3).

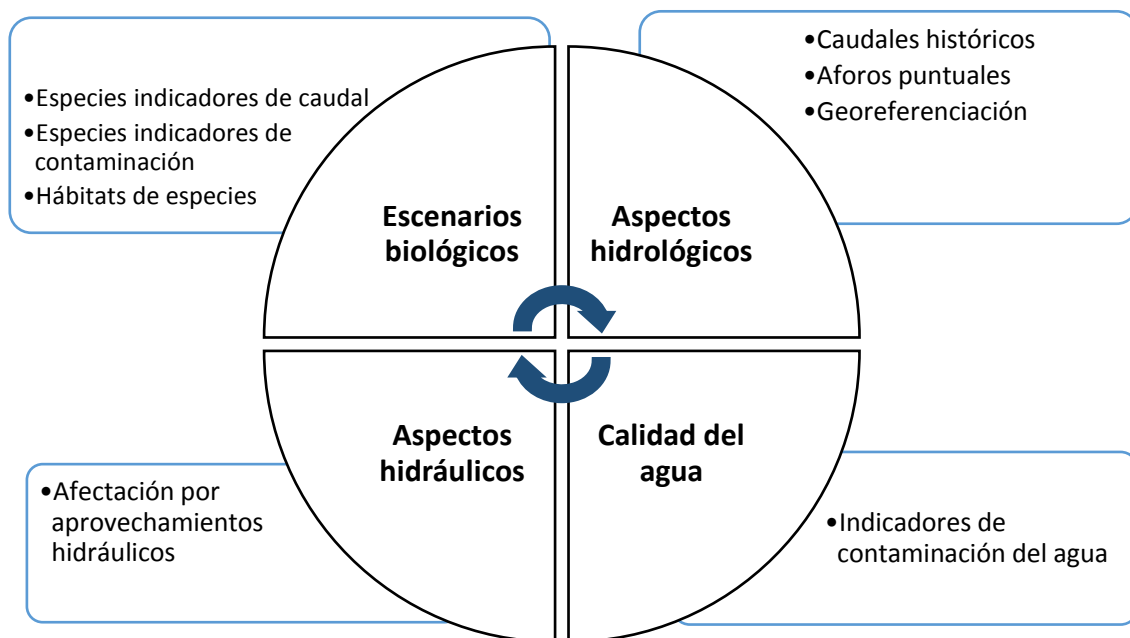


Figura 3. Relación de componentes para determinar el caudal ambiental (Adaptado de Consuegra Martínez (2013))

2.1 Tipos de enfoques de cálculo de caudal ambiental

2.1.1 Enfoque Hidrológico

Es la técnica más simple donde se utilizan datos hidrológicos para determinar índices que luego serán utilizados como flujos recomendados de caudal ambiental. Por lo general, se usa el mínimo flujo (Q95) el cual es el flujo que excede o iguala el 95% del tiempo (Arthington et al., 2004). Utiliza el análisis con series temporales de 5, 10,15, 25 y hasta 50 años de caudales. Las metodologías de este enfoque se dividen en dos grupos: 1) se establece un único valor de caudal ambiental para todo el año o mes, y 2) se establece un régimen completo de caudales ambientales para todo el año. (Lytle & Poff, 2004). Guía Isa. A continuación un resumen de las principales metodologías que se utilizan en este enfoque.

2.1.1.1 Método de aproximación de rangos de variabilidad (RVA)

El método se basa en datos de largos registros hidrológicos diarios, donde se describe la variabilidad hidrológica en el régimen previo al proyecto y después del proyecto. Consta de 32 variables o índices, las cuales son claves para la caracterización del hidrograma y su relación con el funcionamiento del ecosistema, permitiendo un máximo nivel de variación de estos parámetros bajo la situación natural y aquella modificada producto de la operación del proyecto (Servicio de Evaluación Ambiental, 2016). Los 32 índices se derivan de los siguientes parámetros: magnitud de condiciones mensuales, magnitud y duración de las condiciones extremas anuales, duración de las condiciones extremas anuales, frecuencia y duración de impulsos altos y bajos, frecuencia de los cambios en la condición del agua (Consuegra Martínez, 2013). El Cuadro 2 indica las principales características del método RVA.

Cuadro 2. Características de la metodología RVA

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
VARIABLES o índices están muy bien descritos.	Necesita registros de caudales diarios de aproximadamente 20 años.	Caudales mínimos extremos, Caudales mínimos, Eventos de caudales altos, Pequeñas crecidas, Grandes crecidas.	Chile Estados Unidos

Fuente: (Magdaleno, 2009)

2.1.1.2 Método de Tennant o de Montana

El método de Tennant es el método hidrológico más conocido. Las variables utilizadas son los periodos estacionales del año (húmedo o seco) y el caudal medio anual. Dicho método asume un determinado porcentaje de caudal medio que es necesario para que se mantenga el hábitat en condiciones normales. También considera diferentes porcentajes del promedio anual del caudal para distintas condiciones o categorías de ríos, así como su estacionalidad (periodo seco y húmedo). Las categorías recomendadas para caudal ambiental van desde el 10% del promedio medio anual, denominada “condición mínima o pobre”, hasta 60-100% como “rango óptimo” (Alonso-EguíaLis, 2007). Magdaleno (2009) sugiere que un caudal medio anual inferior al 10% provoca la degradación del hábitat del ecosistema fluvial. Santacruz de León y Aguilar-Robledo (2009) indican que el Método de Tennant establece los siguientes criterios de caudal: 1) el 10 % del caudal medio anual es el mínimo recomendable para mantener un hábitat que permite en un corto plazo la sobrevivencia de la mayoría de las formas de vida acuática; 2) el 30 % del caudal medio anual es recomendable para mantener un hábitat adecuado para la sobrevivencia de las diversas formas de vida acuática; 3) el 60 % del caudal medio anual es recomendable para generar un hábitat de características excelentes a excepcionales para la mayoría de las formas de vida acuática, durante los períodos de crecimiento iniciales. El cuadro 3 indica las principales características de este método.

Cuadro 3. Características del método de Tennant

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
Es sencillo de aplicar y se puede adaptar la metodología a otras zonas	Está basada en datos estadísticos de cuerpos acuáticos de los Estados Unidos	Caudales medios anuales, medios mensuales y períodos de estiaje y avenidas	En todo el mundo

Fuente: (Magdaleno, 2009)

2.1.1.3 Método de Tennant modificado para las zonas tropicales de México

La diferencia de este método con respecto a 2.1.1.2 se basa en los caudales medios mensuales y no el promedio anual. Además, se sugiere un porcentaje del 20% para los caudales ambientales mensuales mínimos recomendados en lugar del 10% recomendado por Tennant (Rodríguez Torres, 2012). En México, se ha aplicado establecer caudales recomendados en evaluaciones de impacto ambiental de presas (Gómez-Balandra et al., 2007) en donde se considera la variación climatológica trimestral anual para tratar de reproducir las variaciones de caudal natural durante el año (Alonso-EguíaLis, 2007).

2.1.1.4 Método 7Q10

Este método entrega el valor de un caudal mínimo estadístico, observados durante siete (7) días con periodo de retorno de 10 años, por lo tanto, el caudal ambiental es el valor que será igual o menor que el caudal promedio en cualquier evento de 7 días de sequía consecutivas (Consuegra Martínez, 2013; Magdaleno, 2009). El uso original de este método estuvo únicamente relacionado con la regulación de la contaminación de los ríos, por esta razón no es recomendable utilizar este método para el cálculo de caudales ambientales, pues no se puede probar su validez para la protección de la vida acuática (Magdaleno, 2009). El Cuadro 4 muestra algunas características de esta metodología.

Cuadro 4. Características del método 7Q10

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
Fácil de calcular	No es un método diseñado para el cálculo de caudales ambientales. No contempla la vida acuática	Caudales medios mínimos diarios para un periodo de 10 años	Estados Unidos

Fuente: (Magdaleno, 2009)

2.1.1.5 Método del índice con la curva de duración de caudales

Con este método la curva de duración se construye con los datos de caudales ya sean diarios, mensuales o anuales. Se establece la relación entre rangos de caudales y el porcentaje de tiempo en que cada uno de esos rangos es igualado o excedido. Se definen los caudales de acuerdo a la excedencia, por ejemplo Q95 indicador de las condiciones mínimas extremas de caudal; Q90 se usa como el índice de caudal base y brinda condiciones de caudal estable; Q50 índice utilizado como el caudal necesario para mantener la biota acuática y es el caudal mínimo recomendado para ríos con represas (Consuegra Martínez, 2013).

2.1.1.6 Método del caudal básico de mantenimiento

Este método se basa en el estudio de series temporales de caudales, mediante la utilización de medias móviles. Además, se considera el caudal (Q) como la única variable independiente del ecosistema (Magdaleno, 2009). Los principales parámetros son:

- el caudal básico (Q_b): mínimo caudal absoluto que debe mantener un río;

- el caudal de acondicionamiento (Q_a): cuando el Q_b no es suficiente se da la opción de modificarlo. Este es un caudal suplementario al Q_b y es definido de acuerdo a los objetivos planteados;
- el caudal de mantenimiento (Q_m): caudal mínimo que debe circular en el río a lo largo del tiempo, y responde al resultado de un factor de variabilidad temporal obtenido de la suma de $Q_b + Q_a$. Este factor se encarga de ajustar el Q_b a las tendencias de variación del hidrograma en régimen natural;
- el caudal máximo (Q_h) es el caudal máximo admisible para un río.

El Cuadro 5 describe las principales características de esta metodología.

Cuadro 5. Características del método básico de mantenimiento

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
<p>Es de fácil aplicación y económico.</p> <p>Es objetivo y no arbitrario, ya que se basa en datos de caudales reales</p> <p>Para registros mayores a 25 años el caudal ambiental se define como la mediana para los caudales medios mensuales del mes más seco.</p>	<p>No puede aplicarse a tramos o ríos en los que no existan datos de aforos o los existentes sean insuficientes.</p> <p>Es un método que se basa en la hipótesis del caudal, y sus variaciones determinan los factores físicos y bióticos del hábitat fluvial, lo cual puede que no sea cierto.</p> <p>Se necesitan datos de caudales de al menos 10 años</p>	<p>Caudales medios diarios o mensuales</p>	<p>España Estados Unidos</p>

Fuente: (Consuegra Martínez, 2013)

2.1.1.7 Método de Hoppe

Reconoce los percentiles de la curva de duración de caudales y las condiciones más óptimas para la biota. Se definen los caudales mínimos asociados a diferentes estadios de crecimiento de los indicadores biológicos. De acuerdo a una serie de caudales se determinan los caudales

Q62 (caudal de lavado), Q147 (caudal de desove) y Q294 (caudal de producción y refugio) y así se construye la curva de duración de caudales. En función de la condición que se desea para la biota se determina el caudal requerido (Consuegra Martínez, 2013). El Cuadro 6 menciona algunas características del método de Hoppe.

Cuadro 6. Características de la metodología de Hoppe

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
	Es específico ya que determina caudales para la trucha a partir de un río en Colorado cuya hidrología es específica de la zona.	Caudales diarios, mensuales o anuales	Estados Unidos

Fuente: (Magdaleno, 2009)

2.1.2 Enfoque Hidráulico

En este enfoque se emplean 23 metodologías conocidas y se aplican en 20 países (Tharme, 2003). En este enfoque se utilizan variables hidráulicas como perímetro mojado, velocidad y profundidad del agua como indicadores para relacionar el caudal con ciertos hábitats. El punto de inflexión entre el incremento del caudal y la variable hidráulica indica dónde puede haber alguna reducción significativa de la calidad del hábitat (Arthington et al., 2004). Se emplean relaciones cuantificables entre cantidad y calidad del recurso hídrico, tales como el hábitat y la descarga para el cálculo de los requerimientos del caudal ambiental, efectos específicos de incremento de la descarga sobre el hábitat y características biológicas de requerimientos ambientales, como son áreas de reproducción y crecimiento para algunas especies de importancia económica (Tharme, 2003).

2.1.2.1 Método del perímetro mojado

Este método consiste en la construcción de curvas que muestran la relación entre el caudal con el perímetro mojado (Figura 4). El punto de quiebre es el indicador para definir el caudal admisible para evitar afectación del hábitat. Después de este punto, el incremento del perímetro mojado crece muy lentamente hasta llegar a banca llena. Por lo tanto, el flujo recomendado será aquel que se encuentra cerca de este punto de quiebre (Servicio de Evaluación Ambiental, 2016).. Es un método de fácil aplicación, pero que no considera las

condiciones de habitabilidad de las especies acuáticas, ni tampoco la variación de caudal en el tiempo, elementos fundamentales cuando se determina un caudal ambiental (Aguilimpia & Castro, 2006).

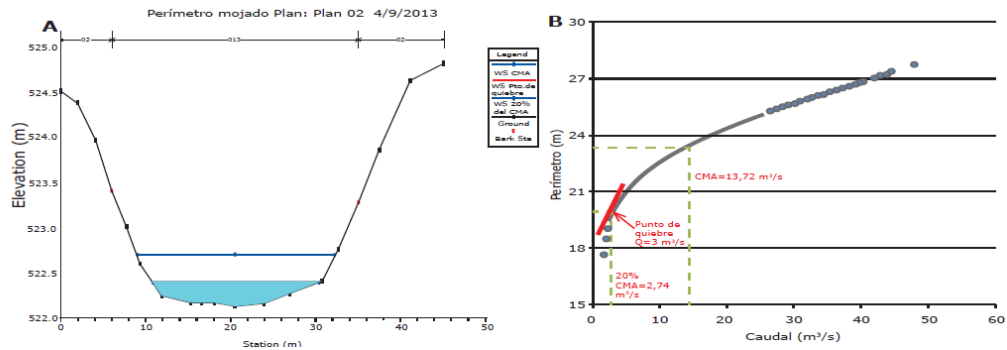


Figura 4. Ejemplo de cálculo del método del perímetro mojado

El Cuadro 7 muestra las características del método del perímetro mojado.

Cuadro 7. Características del método de Perímetro Mojado

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
Su facilidad de implementación y bajo costo de la información a obtener en el campo	En ríos con un cauce poco definido, la elección del punto de quiebre o la determinación del umbral mínimo es difícil de identificar, más aún en ríos con más de un brazo. Estos ríos suelen presentar más de un punto de quiebre, por lo tanto, resulta conveniente no implementar este tipo de métodos en ríos con más de un brazo.	Especie objetivo. Secciones transversales del cauce (puntos donde se desarrollen mesohábitats). Perfiles topobatimétricos, ubicados en las zonas más anchas que profundas del río con el objetivo de graficar de mejor forma los incrementos.	Norteamérica Chile

Fuente: (Servicio de Evaluación Ambiental, 2016)

2.1.2.2 Método de Idaho

Este método se deduce a partir de observaciones en varios ríos no vadeable en Idaho para estimar la reducción de hábitat debido a la reducción del caudal (Cuadro 8). Se basa en el establecimiento de referentes de profundidad mínima y rango de velocidad del agua para distintas especies, según sus respectivas exigencias. Este método no busca establecer caudales mínimos sino caudales recomendados en función del objetivo que se busca y en función de la especie que se estudia (Consuegra Martínez, 2013). Se definen las áreas críticas para la libre circulación, reproducción y crecimiento de especies piscícolas y se determinan secciones transversales en las que se miden velocidad, profundidad y tipo de sustrato. La caracterización física de cada sección transversal es realizada una sola vez para el caudal más bajo. Se utiliza un modelo de simulación hidráulica, para generar los valores de profundidad, velocidad y perímetro mojado, para un amplio rango de caudales (Comisión de Caudal Ambiental Costa Rica, 2018).

Cuadro 8. Características del método de Idaho

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
Es de fácil aplicación si se tienen los datos requeridos.	Requiere validación ya que fue creado para las condiciones específicas de los ríos de Idaho.	Levantamientos topográficos de la zona de estudio. Se deben determinar también parámetros de profundidad, velocidad y tipo de sustrato. Establecer la o las especies objetivos a analizar. Modelación hidráulica	Idaho (Estados Unidos)

Fuente: (Consuegra Martínez, 2013; Magdaleno, 2009)

2.1.3 Enfoque Hidrobiológico o de Simulación del hábitat

Hace uso de las relaciones hábitat-hidráulica-descarga pero utiliza además curvas de preferencias de las especies. De esta manera, este método integra las respuestas hidrológica-

hidráulica-biológica. La información que se utiliza es basada en variabilidad temporal del río relacionada con las condiciones de hábitat de peces o invertebrados (Arthington et al., 2004). Estos métodos requieren información de la topografía del curso de agua y de la ecología de las especies o comunidades que se quiere conservar, con esto se busca relacionar el ámbito hidráulico con el hábitat disponible de la especie indicadora (Comisión de Caudal Ambiental Costa Rica, 2018).

2.1.3.1 Curvas de preferencia

Este método establece que la idoneidad del hábitat puede ser determinada a partir de los requerimientos estacionales para diferentes ciclos biológicos o etapas de desarrollo (Cuadro 9). Si se consideran varias especies a la vez, pueden aparecer algunos conflictos entre preferencias por lo que se recomienda la aplicación de criterios específicos, como el de especies indicadoras o de hábitat de agrupación. Las técnicas más utilizadas para desarrollar curvas de preferencia son la captura con redes o pesca eléctrica, la biotelemetría y las técnicas de observación directa de los peces. Con relación a las variables físicas para el desarrollo de curvas de preferencia destacan la profundidad del agua, la velocidad el agua, el sustrato del cauce y la presencia o no de refugio para organismos acuáticos estudiados (Magdaleno, 2009).

Cuadro 9. Características del método de curvas de preferencia

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
Considera el hábitat de las especies.	No es posible utilizar este método si no existen especies indicadoras de caudal.	Secciones transversales. Especies bajo estudio. Profundidad y velocidad del cauce. Temperatura del agua. Tipo de sustrato. Las longitudes del tramo de análisis deben tener una longitud de entre 10 y 15 veces la anchura del cauce	España Estados Unidos

Fuente: (Magdaleno, 2009)

2.1.3.2 Método IFIM (*Instream Flow Incremental Method*)

Este método a partir de datos hidrológicos, hidráulicos y biológicos, permite modelar el efecto de los cambios en caudal sobre la estructura de la corriente en estudio, la calidad del agua y la disponibilidad de hábitats y la temperatura del agua.(Consuegra Martínez, 2013). La metodología IFIM tiene como objetivo evaluar los efectos del cambio del caudal sobre determinado hábitat; por esta razón, simula las condiciones hidráulicas del microhábitat por medio de un modelo computacional conocido como PHABSIM (Physical Habitat Simulation Model), el cual calcula la profundidad del agua, velocidad y demás características del cauce que podrían verse afectadas (Cuadro 10). La modelación hidráulica permite predecir los cambios de profundidades y velocidades de las secciones para un rango de caudales. Las curvas de preferencia definen el grado de adecuación de los organismos. La modelación posterior combina la modelación hidráulica de curvas de preferencia para determinar la

relación de Q con el índice de hábitat y así obtener los caudales ambientales (Alonso-EguíaLis, 2007; Armour and Taylor, 1991).

Cuadro 10. Características del método IFIM

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
No establece valores mínimos, en lugar de esto lleva a cabo procesos de negociación y decisión que evalúan las diversas alternativas.	Requiere de mucha información para poder ser aplicado. Cada vez que se aplica la metodología, se está creando un modelo nuevo y específico para el caso en cuestión. Complejidad de la modelación del hábitat y dificultad de implementación.	Inventario de hábitats. Secciones transversales. Velocidades y profundidades de las secciones. Curvas de preferencia. Uso del modelo PHABSIM para relacionar Q vrs. hábitat	Estados Unidos Canadá España Colombia Chile

Fuente: (Consuegra Martínez, 2013)

2.1.3.3 *Análisis incremental*

El análisis incremental plantea un estudio del hábitat, mediante la evaluación de secciones transversales del río (Cuadro 11). En cada una de estas secciones se determina un número de celdas individuales, en las que se observa cómo varían los distintos parámetros físicos, químicos y del hábitat, en función de los distintos caudales circulantes. Con esta información se obtienen curvas de evolución del hábitat en función del caudal (Mayo Rustarazo, 2000).

Cuadro 11. Características del método de análisis incremental

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
Se contemplan aspectos físicos y químicos del cauce del río	Estos estudios se han realizado principalmente para las especies piscícolas de trucha y salmón	Levantamientos batimétricos. Variables físicas de velocidad, profundidad y cobertura del cauce. Variables químicas de temperatura, pH, nivel de oxígeno disuelto.	España

Fuente: (Mayo Rustarazo, 2000)

2.1.4 Enfoque Holístico

El enfoque holístico considera como principio la observación del sistema fluvial completo. Las metodologías de este enfoque se han aplicado principalmente en países como Sudáfrica, Australia, Reino Unido y, recientemente, en Costa Rica (Rodríguez, 2007). Este enfoque consiste en reconocer los eventos hidrológicos importantes o críticos del patrón de flujo que definen la variabilidad natural y que dan dirección a los principales atributos del ecosistema acuático, por lo que requieren, para ello, considerable información de tipo multidisciplinaria (Alonso-EguíaLis, 2007). Las metodologías de este enfoque incluyen un manejo integrado de todos los factores biológicos, abióticos, socioeconómicos y el espectro completo del régimen hidrológico, incluyendo tanto su variabilidad espacial como temporal. Por lo tanto, son esencialmente interdisciplinarios (Comisión de Caudal Ambiental Costa Rica, 2018).

2.1.4.1 Método de Building Block (BBM) - Enfoque Bottom-up

Este método asume que las especies fluviales dependen de elementos básicos del régimen de caudal, incluyendo caudales mínimos e inundaciones, para conservar la dinámica de sus sedimentos y la estructura geomorfológica del río (Cuadro 12). Para la aplicación de este método se necesita de expertos de diferentes áreas, que a través de determinados pasos evalúan los datos recabados para llegar luego a un consenso sobre cuáles serán los bloques de construcción del régimen de caudal ambiental (Magdaleno, 2009). Los principales pasos

para llevar a cabo esta metodología son: 1) identificación del escenario objetivo para el río o tramo; 2) selección del lugar de estudio y evaluación de la integridad de los hábitats riparios; 3) análisis geomorfológicos del tramo del río y de la cuenca; 4) recopilación de datos hidráulicos en las secciones establecidas para el estudio y modelación hidráulica local de las mismas; 5) obtención de datos históricos de caudales, en condiciones naturales y con regularización; 6) evaluación de la importancia socio-económica, ambiental y cultural del tramo del río en cuestión (Guevara Torres and Rodríguez Pérez, 2013). Por lo general, se trabajan desde 1 hasta 5 secciones dependiendo del tamaño del área de estudio, en cada sección se debe analizar el tipo de vegetación, además de información hidrológica, como curvas de duración de caudal, periodo de retorno, así como el aporte de las aguas subterráneas (Castro et al, 2006). Se establece la relación entre los caudales y las características hidráulicas, la morfología del canal y los biotopos para generar propuestas de un caudal ambiental que garantice el ciclo de vida de la fauna acuática (peces, macroinvertebrados, renacuajos, etc). También debe garantizar los usos socioeconómicos y culturales del río, además de los ciclos vegetativos de las especies que se encuentran en la ribera, cuyo ciclo de vida depende de la disponibilidad del agua en determinada época del año, y por último la navegabilidad en los casos que aplica (Comisión de Caudal Ambiental Costa Rica, 2018).

Cuadro 12. Características del método Building Block

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
Toma en consideración el hábitat acuático y los factores antrópicos que se desarrollan en el río.	Fuerte dependencia de la existencia de datos de calidad de los caudales históricos del río. Se basa en la opinión profesional de los expertos por lo que puede estar sometida a cierto sesgo y subjetividad.	Caudales históricos de los ríos. Secciones transversales del cauce. Especies que habitan en el ecosistema fluvial. Actividades socio-económicas que se desarrollan en el río.	Sudáfrica Australia

Fuente: (Arthington et al., 2004; Magdaleno, 2009)

2.1.4.2 Metodología RANA-REGINA

Esta metodología fue desarrollada por el ICE y consiste en el cálculo del caudal ambiental a partir de un caudal mínimo aceptable (CMA). Dicha metodología utiliza un programa de computo, el cual se alimenta con los siguientes parámetros: caudal mínimo natural el cual se obtiene a través de datos hidrológicos y meteorológicos históricos y actuales; indicadores biológicos del mantenimiento de la biodiversidad, especies más sensitivas y sus requerimientos, datos socioeconómicos y demandas de uso de agua, y un modelo hidráulico (Alonso-EguíaLis, 2007). El propósito del desarrollo de esta metodología fue para tener una herramienta para estimar el caudal de compensación de los proyectos hidroeléctricos. Por medio de esta metodología se tiene la posibilidad de analizar las condiciones iniciales, o línea base, y el efecto de las diferentes alternativas de regulación en las condiciones físicas, biológicas y socioeconómicas en un sector específico de interés, o en la integralidad del río estudiado (Chaves et al., 2010, 2006; Krasovskaia and Gottschalk, 2014). El Cuadro 13 resume las principales características de este método.

Cuadro 13. Características del método RANA-REGINA

Ventajas	Desventajas	Datos requeridos	Dónde se ha utilizado
Combina aspectos físicos, ecológicos, sociales, económicos y culturales, con el objetivo de que exista una equidad de los recursos.	Se necesita gran cantidad de información de todas las áreas del conocimiento involucradas para desarrollar esta metodología	Curvas de preferencia de las especies analizadas. Modelación hidráulica. Información socioeconómica de la cueca	Costa Rica

Fuente: (Alonso-EguíaLis, 2007; Krasovskaia and Gottschalk, 2014)

La aplicación de las metodologías anteriormente expuestas depende de la disponibilidad de recursos e información. El Cuadro 14 presenta a continuación un resumen de las principales ventajas y desventajas generales de los diferentes enfoques.

Cuadro 14. Comparación de las ventajas y desventajas de los diferentes enfoques para el cálculo de caudal ambiental

Enfoque	Ventaja	Desventaja
Hidrológico	Facilidad de cálculo Información requerida es de fácil acceso (registros hidrológicos)	No toma en consideración las características físicas y biológicas de los cauces. Algunos métodos (Tennant) fueron desarrollados para sitios específicos. El caudal ambiental puede ser subvalorado o sobrevalorado con respecto a los requerimientos reales.
Hidráulico	Establece nexos entre la hidráulica de una corriente y el bienestar del ecosistema	Se asume que a partir de variables del cauce (lámina de agua, perímetro mojado y velocidad) se pueden determinar las condiciones óptimas para los ecosistemas. Esto no se comprueba
Hidrobiológico	Interrelacionan las características hidráulicas y de ecosistemas Permiten predecir los cambios de los ecosistemas de acuerdo a cambios en el régimen del cauce	No se pueden generalizar los resultados y la selección de la especie de estudio es crítica. Dificultad para obtener información para las curvas de preferencia. Requiere frecuentes campañas de monitoreo y muestreo de especies
Holístico	Implementación de los enfoques anteriores. Da una mayor cobertura al análisis lo que permite encontrar una condición óptima de los ecosistemas en función del caudal Permite reproducibilidad.	Requiere un trabajo interdisciplinario de diferentes profesionales y ramas del conocimiento. Requiere gran cantidad de información de las áreas del conocimiento involucradas.

Fuente: (Consuegra Martínez, 2013)

3. Metodología

El proyecto consistió de dos fases. Fase I: Propuesta de una metodología para el cálculo de caudal ambiental en el marco de las concesiones de agua otorgadas por la Dirección de Agua del Minae; Fase II: Validación de la metodología de cálculo propuesta.

Fase I: Propuesta metodológica para el cálculo de caudal ambiental

Esta fase consistió en la confección de convenios, sesiones trabajo en conjunto con la Dirección de Agua, validación de la propuesta con talleres nacionales y la conformación de la Comisión de Caudal Ambiental:

- a. Confección de convenios con TEC-Minae y TEC-Jasec: dichos convenios fueron suscritos con el fin de establecer vínculos de mutua colaboración en el tema de caudal ambiental, donde las instituciones suministran información y equipo para que en el TEC se pueda retornar un producto que apoye la gestión de ambas instituciones. (Anexo 1)
- b. En paralelo a los talleres se realizaron sesiones de trabajo con la Dirección de Agua del MINAE dando seguimiento a un plan de trabajo en la consecución de una guía metodológica acorde con las necesidades del país, el cual se detalla en el Anexo 2.
- c. Validación de la propuesta metodológica: se realizaron tres talleres nacionales de validación del caudal ambiental con el fin de exponer el formato de validación a los principales actores del agua del país (empresa privada e instituciones gubernamentales y no gubernamentales). El primer taller fue convocado por el TEC y el Viceministerio de Agua, Costas y Humedales y los siguientes dos talleres fueron convocados por la UNESCO (el TEC formó parte de la comisión organizadora). (Ver lista de asistencia, presentación y agenda del primer taller en el Anexo 3).
- d. Después del primer taller de validación se conformó la Comisión de Caudal Ambiental (incluyendo al TEC como participante y organizador) con el fin de generar la metodología a nivel nacional. Del trabajo de esta comisión se deriva el documento que se encuentra en el Anexo 4. El documento producto de esta Comisión (de la cual la Escuela de Ingeniería Agrícola del TEC formó parte) es un complemento de este trabajo ya que los productos de este proyecto, al ser de interés nacional, no pueden haberse obtenido sino eran en cooperación con los principales actores del agua del país.

Fase II: Validación de la propuesta metodológica para el cálculo de caudal ambiental en una cuenca piloto

3.1 OE.1: Determinación el comportamiento hidrológico de la cuenca

3.1.1 Selección de la cuenca y caracterización hidrológica

Se seleccionó la cuenca del río Birris la cual pertenece a la cuenca alta del río Reventazón (Figura 5). Dicha cuenca se encuentra ubicada en la provincia de Cartago y las aguas reciben influencia de los cantones de Oreamuno, Alvarado, Paraíso y Pacayas. La cuenca comprende 83,5 ha. e inicia en las faldas del Volcán Irazú (3400 msnm) hasta los 100 msnm (en la estación de puesto 3 de la empresa Jasec). Imágenes de las características del caudal se encuentran en el anexo 6.

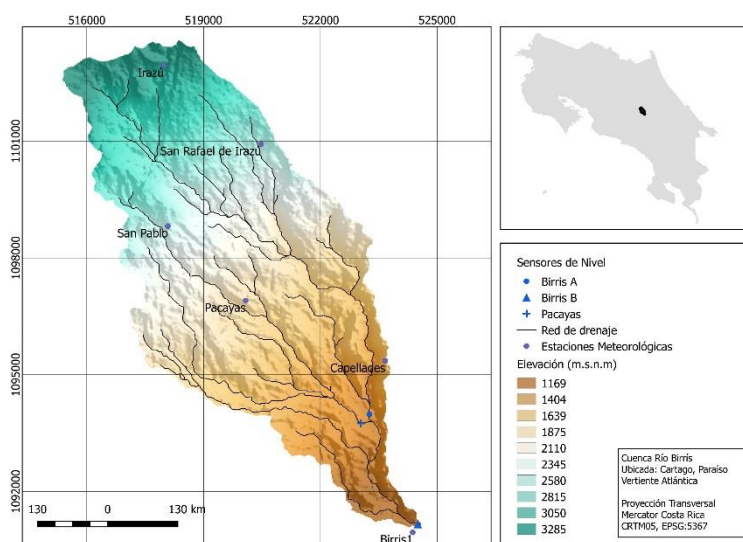


Figura 5. Ubicación de la cuenca del río Birris.

La selección de esta cuenca para el estudio se basó principalmente en que es una cuenca pequeña, con datos históricos de caudales y clima y en ella se encuentran todos los usos (consuntivos y no consuntivos). En esta cuenca se encuentra la planta hidroeléctrica de JASEC la cual toma el agua del río Birris y Pacayas y cuenta con dos embalses (Puesto I y puesto II). Esta cuenca presenta suelos profundos de origen volcánico clasificados como Andisoles. En la parte alta de la cuenca presenta alta densidad de cobertura vegetal y hacia

la parte media y baja las tierras se usan más para la agricultura, especialmente pastos y hortalizas (Lianes et al., 2009). La Figura 5 muestra la ocupación de la superficie de la cuenca. La capa de uso del suelo se obtuvo por medio del uso del software Qgis v.3.20 por medio de una clasificación semisupervisada utilizando imágenes multiespectrales Sentinel 2. Por medio de esto se crearon áreas de entrenamiento y con la herramienta SCP (Semi-automatic classification plugin) se obtuvieron las firmas espectrales para cada uso del suelo para así hacer la clasificación para el área en estudio (Figura 6).

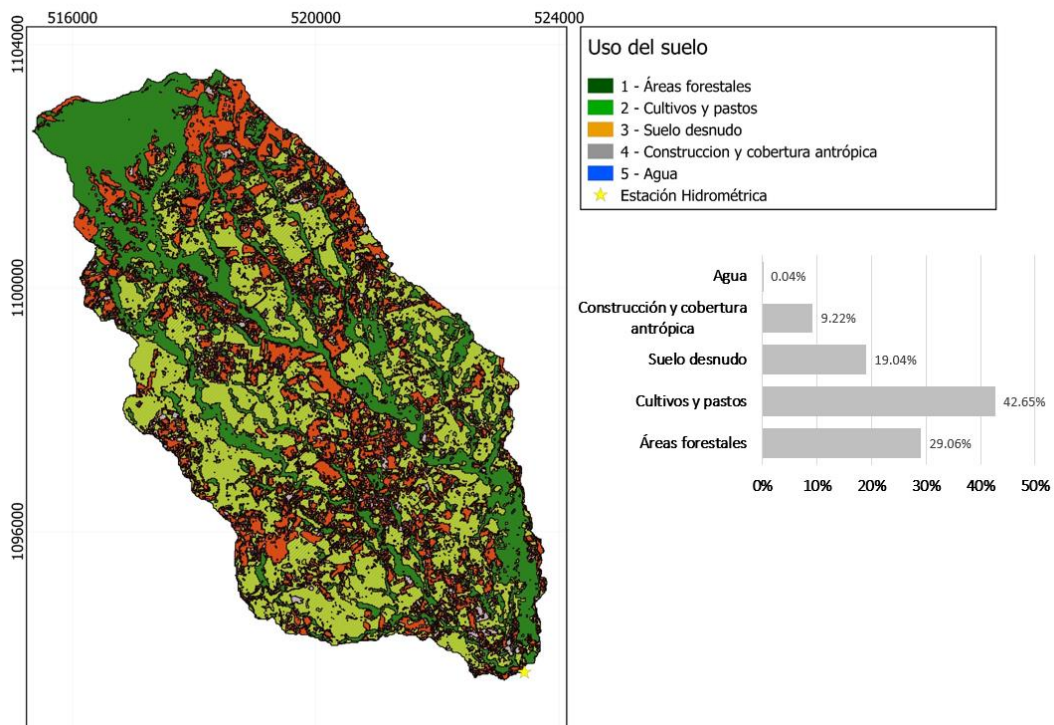


Figura 6. Clasificación de uso de la tierra de la cuenca del río Birrís.

Para la cuenca se definieron los parámetros fisiográficos tales como: área de la cuenca, longitud del cauce, elevaciones, pendientes, usos de la tierra, sistema y densidad de drenaje. El sistema de drenaje de la cuenca fue uno de los parámetros de importancia para establecer los puntos de control para la toma de datos de caudal.

3.1.2 Análisis temporal de clima y caudales en el corto y largo plazo

Para obtener las estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca se identificaron las estaciones dentro y en los alrededores de la cuenca y se utilizó el método del polígono de

Thiessen para la triangulación (Figura 7). A partir de este método se obtuvieron las series de datos climatológicas diarias del largo plazo (al menos 10 años).

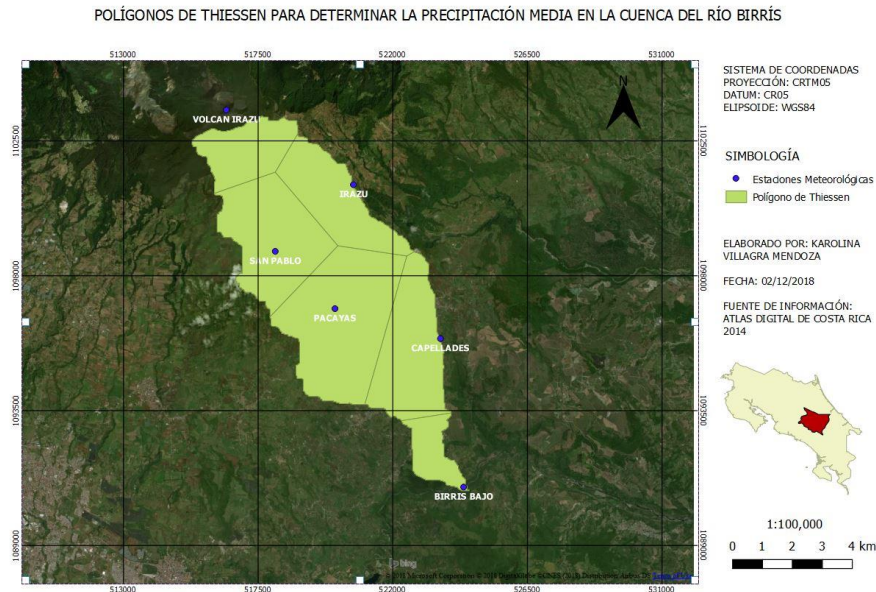


Figura 7. Método del polígono de Thiessen para la triangulación de las estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca del río Birris.

Para dar más información a los modelos se instalaron dos pluviómetros, uno en la parte alta de la cuenca y otro en la parte baja (puesto III de Jasec). Con estos datos se logró hacer una correlación de los datos de precipitación de los pluviómetros con los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas. La información resultante se utilizó para rellenar con un análisis de regresión la información faltante (completación).

La obtención de las series de caudal se obtuvo de datos históricos registrados en el embalse de Jasec en puesto II (periodo 02-2013 al 12-2016). Por la confidencialidad de los datos firmada en el convenio con Jasec estos datos no se pueden compartir. Además, se instalaron en abril del 2017 sensores de presión (en tres puntos estratégicos) con el fin de registrar los volúmenes tanto en época de estiaje como de avenidas. Sin embargo, debido al vandalismo y las crecidas en los puntos de control instalados, no fue posible obtener los datos. Sin embargo, se mantuvo un punto de control en la confluencia de los ríos Pacayas y Birris (Figura 8). Además, la Dirección de Agua instaló sensores de presión a partir de diciembre del y que por medio del convenio firmado se tiene acceso a los datos.

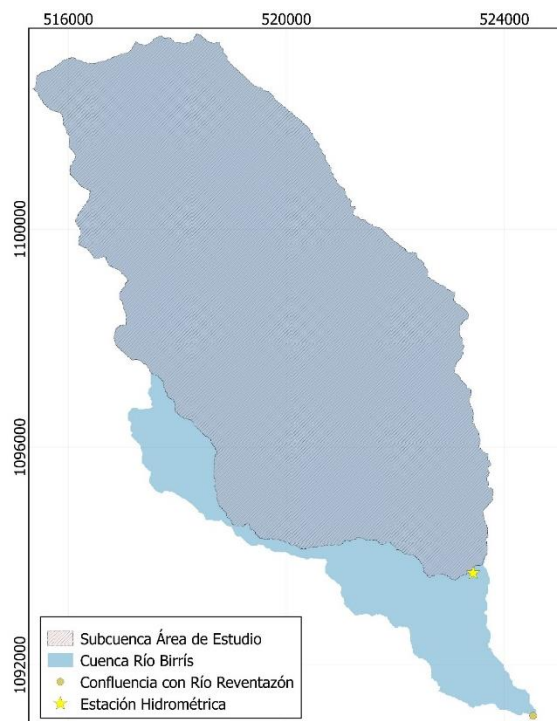


Figura 8. Ubicación del punto de control para medición de caudales.

3.1.3 Identificación del uso del agua en función de las actividades socioeconómicas en la zona de estudio

La información concerniente a los usos del agua y actividades económicas en la cuenca se obtuvieron de los registros suministrados por la Dirección de Agua del MINAE. En el Cuadro 15 se muestra una economía basada en industria (uso despreciable), la producción agrícola de hortalizas (8,8%), consumo humano en términos de agua potable (11,3%) y generación hidroeléctrica (79,9%). Además, de acuerdo a las visitas de campo se pudo observar que los sistemas de producción se basan en una economía campesina haciendo uso de sistemas tradicionales, con escasa tecnificación e ineficiente uso del suelo y agua. Además, existe un deterioro ambiental por las aguas vertidas lo cual fue evidenciado en el estudio biológico.

Cuadro 15. Datos de concesiones otorgadas por la Dirección de Agua

Estado	Caudal en (l/s)					
	Producción Agrícola	Agropecuario	Consumo Humano	Fuerza hidráulica	Industria	RIEGO
CANCELADO	0	0	20.9	0	0	0
CANCELADO POR MOROSIDAD	0.89	0	0.08	0	0	3.65
CANCELADO POR VENCIMIENTO	4.7	0	2.37	1230	0	10.98
DENEGADO	0	0	0	0	0	0
INSCRITO	0	0	21.25	0	0	0
OTORGADO	4.64	0	128.96	0	0.18	110.66
SOLICITUD NUEVA	0	0	0	0	0	0
Total general	10.23	0	173.56	1230	0.18	125.29

Fuente: Dirección de Agua del MINAE

3.1.4 Descripción biótica de la zona de estudio

Se realizaron tres estudios biológicos en diferentes periodos para diagnosticar el comportamiento biológico del río Birris (Anexo 5):

- 28 de marzo del 2017 (en puesto Jasec II el 11 de abril del 2017)
- 18 de julio del 2017
- 2 de noviembre del 2017

Dicho estudio estuvo a cargo de un biólogo contratado específicamente para este y se realizó de la siguiente forma:

- Estudio biológico en puntos de aforo existentes
- Recolección de organismos con coladores y preservados en alcohol a 80%
- Identificación en el laboratorio del nivel de orden, familia y género
- Puntos de muestreo Capellades, Puente río Birris, Puente río Pacayas y Central Jasec puesto III

3.2 O.E.2: Valoración de diferentes metodologías para la determinación de caudal ambiental en otros países.

Este objetivo corresponde a la metodología indicada en la Fase I. Como complemento, se realizó una revisión exhaustiva de las metodologías existentes para calcular el caudal ambiental, por ejemplo: la metodología hidrológica, de valoración hidráulica, de simulación de hábitat, y metodología holística.

Se realizó un cuadro comparativo de metodologías con todas las variables e indicadores y métodos de cálculo utilizados. De acuerdo a la información recopilada, se hizo una

clasificación de las variables de acuerdo a los criterios establecidos. Con las variables o indicadores identificados y clasificados, se realizó una clasificación de acuerdo a las condiciones y necesidades del país. Esto se encuentra en la Guía de Caudal Ambiental (Anexo 4). Esta guía es el instrumento para evaluar el caudal ambiental en las diferentes cuencas del país. Para el caso específico de este proyecto, se escogió la metodología que mejor se adaptaba de acuerdo a las características hidrológicas, fisiográficas y ecológicas.

El producto de este objetivo es un producto país, es decir, se tiene en el documento propuesto por la Comisión de Caudal Ambiental (Anexo 4).

3.3 O.E.3: Evaluación de la metodología para una cuenca piloto.

De acuerdo a los resultados del estudio biológico y condiciones fisiográficas, hidráulicas y de concesiones de la cuenca se determinó la metodología que mejor se adaptaba a la cuenca del río Birrís. Debido a que la cuenca presentaba una fuerte degradación biótica y tomando en consideración la completa alteración de los regímenes de caudal producto de las concesiones actuales se determinó que la metodología más adecuada para determinar el caudal óptimo para esta cuenta es la Hidrológica por medio de una adaptación del método de Hoppe basado en el análisis de las curvas de duración de los caudales registrados (Método descrito en sección 2.1.1.5). Esta metodología tiene la ventaja de que no proporciona un caudal ambiental fijo sino que se basa en un régimen variable de acuerdo a las condiciones de caudal mensuales y utiliza como valores de entrada los caudales históricos mensuales.

La modelación hidrológica se realizó con el software HBVlight v.2 (Seibert, 2005). Dicha modelación se dividió en dos partes: la calibración y la simulación. El pre-proceso incluyó la entrada de las series de precipitación y temperaturas diarias (2007 al 2017) (Figuras 9 y 10) y caudales diarios observados (2013 al 2016), Con estas series de datos se obtuvieron las series de caudales simulados del 2007 al 2017. Para el post-proceso se utilizaron los caudales teóricos y el coeficiente de Nash para realizar el ajuste de los modelos y obtener los parámetros de calibración del 2013 al 2016. Estos parámetros de calibración se utilizaron para realizar las simulaciones del periodo de 10 años (del 2007 al 2017) y obtener los caudales simulados para toda la serie de datos (Figura 11).

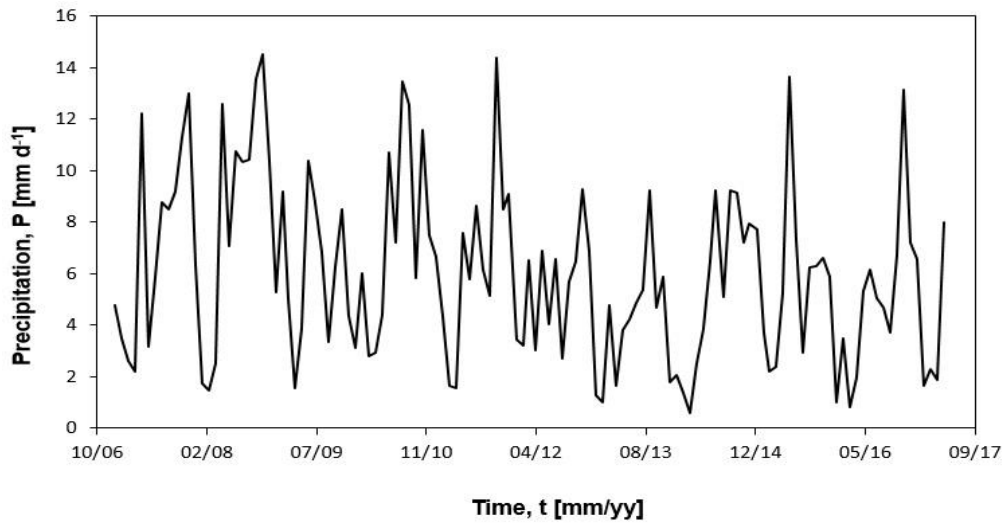


Figura 9. Precipitación media diaria de la cuenca del río Birrís obtenida de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca.

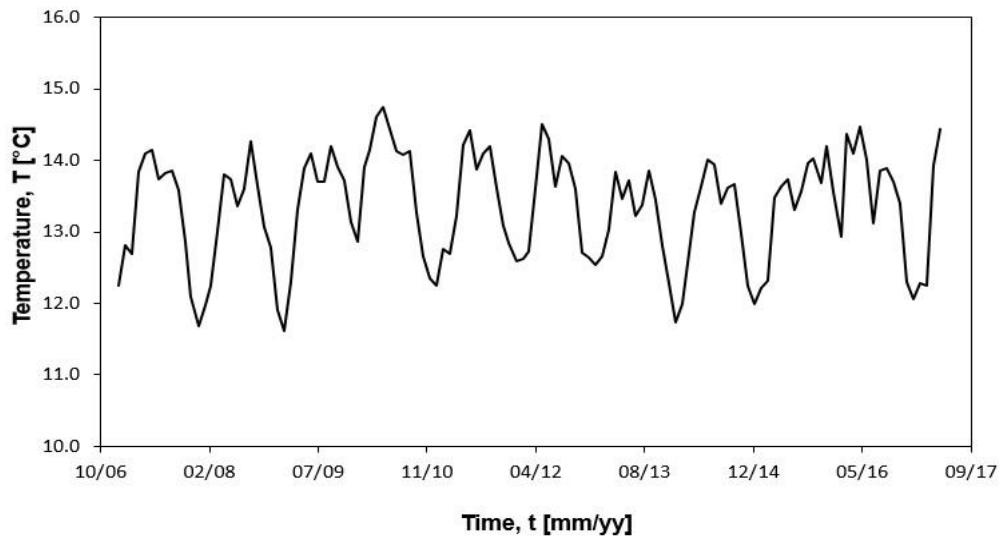


Figura 10. Temperatura media diaria de la cuenca del río Birrís obtenida de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca.

Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Mes											
Q Observado											
Precipitación Temperatura											
Q Simulado											
Modelo HBV											

Figura 11. Procedimiento de la modelación hidrológica: periodos de simulación y datos de entrada y salida.

3.3.1 Modelo HBV light (Seibert, 2005)

El modelo se basa en la simulación de descargas diarias utilizando precipitación diaria, temperatura y evapotranspiración como entrada. La precipitación puede ser simulada como lluvia o nieve y dependerá de si la temperatura se encuentre por arriba o debajo de la temperatura umbral TT ($^{\circ}C$). Toda precipitación simulada como nieve es cuando la TT baja y es multiplicada por un factor de corrección de nevadas $SFCF$ (-). El deshielo es calculado con el método del día de grado:

$$melt: CFMAX(T(t) - TT) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Melt: Deshielo ($mm \text{ día}^{-1}$)

CFMAX: Factor de grado-día ($mm \text{ }^{\circ}C^{-1} \text{ día}^{-1}$), valores bajos corresponden a zonas boscosas

$T(t)$: Temperatura del día t ($^{\circ}C$)

TT : Temperatura umbral ($^{\circ}C$)

El agua que se derrite y la lluvia son retenidas en dentro de la capa de nieve hasta que es excedido cierta fracción del equivalente del agua de la nieve CWH (-). El agua que es retenida dentro de la capa de nieve se vuelve a congelar según:

$$refreezing: CFR * melt \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

refreezing: Recongelamiento (mm día^{-1})

CFR: Coeficiente de congelamiento [-]

melt: Deshielo (mm día^{-1})

Las precipitaciones y el deshielo (P) son divididas en el agua que llena la capa de suelo y la recarga del agua subterránea y dependerán de la relación entre el contenido de agua en la capa del suelo SM (mm) y su valor más grande FC (mm):

$$\frac{recharge}{P(t)} = \left(\frac{SM(t)}{FC}\right)^{BETA} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

SM: Contenido de humedad del suelo actual (mm)

BETA: parámetro que determina la contribución relativa a escorrentía por lluvia o deshielo (-)

FC: Almacenamiento máximo de humedad del suelo (mm)

P: Precipitaciones y deshielo

Recarga: Flujo de agua subterránea (mm día^{-1})

La evaporación real de la capa del suelo es igual a la evapotranspiración potencial si SM/FC se encuentra por encima de LP (-) mientras que un lineal de reducción se usa cuando SM/FC se encuentra por debajo de LP, según:

$$E_{act} = E_{pot} \min\left(\frac{SM(t)}{FC*LP}, 1\right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

LP: valor de humedad del suelo por encima del cual Eact llega a Epot (mm)

Eact: Evapotranspiración real (mm/h)

Epot: Evapotranspiración potencial (mm/h)

SM: Contenido de humedad del suelo actual (mm)

FC: Almacenamiento máximo de humedad del suelo (mm)

La escorrentía de agua subterránea se calcula como la suma de 2 o 3 ecuaciones lineales de salida, esto dependiendo de si SUZ está por encima de un valor umbral USL (mm) o no:

$$Q_{GW}(t) = K_2SLZ + K_1SLZ + K_0\max(SUZ - UZL, 0) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$Q_{GW}(t)$: Escorrentía de agua subterránea

SLZ: máxima tasa de percolación desde la capa de agua subterránea superior a la inferior (mm)

SUZ: La recarga de agua subterránea que se agrega a la capa de agua subterránea superior.

USL: Volumen límite de almacenamiento en la celda subsuperficial (mm)

K1: Coeficiente de recesión de descarga rápida

K2: Coeficiente de recesión de descarga lenta

K3: Coeficiente de recesión subterránea

Además algunos de esos parámetros han de cumplir algunas condiciones como las siguientes:

- Los coeficientes K1, K2, K3 no pueden ser mayores que 1.
- Se debe cumplir que $K1 > K2 > K3$.
- Si la suma de $K1+K2+K3 > 1$ existe el riesgo de generar un error de balance.

Esta escorrentía es finalmente transformada por una función de ponderación triangular definida por el parámetro MAXBAS para dar la escorrentía simulada (mm día^{-1}):

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i:1}^{MAXBAS} c(i) * Q_{GW}(t - i + 1) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$$c(i) = \int_{i-1}^1 \frac{2}{MAXBAS} - \left| u - \frac{MAXBAS}{2} \right| \frac{4}{MAXBAS^2} du$$

MAXBAS: Longitud de la función triangular de interpolación (1-100)

Si se utilizan diferentes zonas de elevación, los cambios de precipitación y temperatura con elevación se calculan utilizando los dos parámetros PCALT (%/100m) y TCALT ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$):

$$P(h) = P_0 \left(1 + \frac{PCALT(h-h_0)}{10000} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$h - h_0$: Diferencia de elevaciones

P(h): Cambio de la precipitación a diferentes zonas de elevación

PCALT: Coeficiente de dependencia entre la Precipitación y la cota topográfica.

$$T(h) = T_0 - \left(\frac{TCALT(h-h_0)}{100} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$h - h_0$: Diferencia de elevaciones

T(h): Cambio de la temperatura a diferentes zonas de elevación

TCALT: Gradiente vertical de temperatura

La media a largo plazo de la evaporación potencial $E_{pot,M}$ para un determinado día del año puede ser corregido a su valor en el día t, $E_{pot}(t)$ usando las desviaciones de la temperatura, T (t), desde su media a largo plazo T_M y un factor de corrección C_{ET} ($^{\circ}C^{-1}$):

$$E_{pot}(t) = (1 + C_{ET}(T(t) - T_M))E_{pot,M} ; 0 \leq E_{pot}(t) \leq 2E_{pot,M} \quad \text{Ecuación 9}$$

De la estructura del modelo se extrae la influencia que tienen los parámetros en la generación de escorrentía:

- Los parámetros de humedad en el suelo (FC, LP y β) determinan la evapotranspiración real y por tanto la escorrentía total generada.
- El parámetro β es el factor determinante de la infiltración. Cuanto menor es su valor mayor es la filtración al nivel sub-superficial.
- El resto de parámetros regulan la descarga subterránea, y si son definidos correctamente, K1 determina la descarga rápida y el resto (K2, y K3) regulan la descarga a más largo plazo y la curva de recesión del río a largo plazo.

La eficiencia del modelo está dado por diferentes funciones objetivo (Cuadro 16):

Cuadro 16. Objetivo de funciones.

Objetivo de función	Ecuación	Valor de ajuste perfecto
Eficiencia (Reff)	$1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$	1
Eficiencia usando errores ponderados 1 (Reff ponderado)	$1 - \frac{\sum w(Q_{obs})(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum w(Q_{obs}) \sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$	1
Eficiencia usando ln(Q) (logReff)	$1 - \frac{\sum(\ln Q_{obs} - \ln Q_{sim})^2}{\sum(\ln Q_{obs} - \overline{\ln Q_{obs}})^2}$	1
Coficiente de determinación r2	$\frac{(\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}))^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}$	1
Diferencia significativa (Meandiff)	$\sum \frac{Q_{obs} - Q_{sim}}{No\ de\ días} * 365$	0

La función de ponderación $w(Q_{obs})$ debe ser definida por el usuario

3.3.1.1 Monte Carlo

El análisis de Monte Carlo sirve para hacer el ajuste de rangos para todos los parámetros, inicio y fin del período de simulación y comienzo del *período de calentamiento*, es decir, permite la ejecución de múltiples modelos con parámetros aleatorios. Se puede cargar o guardar valores de parámetros, esto por si se desea ver valores antiguos o para mantener un conjunto de parámetros para su uso posterior. Los valores de los parámetros son elegidos al azar dentro del rango dado y el modelo se ejecuta usando estos parámetros. Los resultados de la simulación que son valores de parámetros y valores de las funciones objetivo se almacenan en un archivo con el nombre multixxx.dat donde xxx es el *Modelo-Ejecutar-No*, este archivo contiene ambos valores de parámetros y resultados de simulación (medidas de bondad de ajuste). Para crear gráficos de puntos se recomienda abrir el archivo en Excel, Grapher o programas similares. Si usa el mismo *Modelo-Ejecutar-No* antes de que el archivo antiguo se sobrescriba el número máximo de ejecuciones del modelo viene dado por *No de ejecuciones modelo*. Sin embargo, las simulaciones pueden detenerse presionando el botón *Parar carreras* que aparece después de presionar el botón *Iniciar carreras* Al marcar el

Guardar solo si $Reff > \dots$ - box, se puede reducir el número de ejecuciones del modelo almacenado.

Si se usa la opción de Monte Carlo siempre con más de una zona de vegetación, se debe elegir para cada parámetro si su valor para cada zona debe calcularse solo al azar (R) o si su valor debe ser igual para todas las zonas (=), aumentar de la zona 1 a 3 (<), o disminuir (>). Si hay diferentes zonas de elevación, los valores de PCALT y TCALT son tomados como se muestra en la ventana de parámetros.

3.3.1.2 Estructura del modelo esquemático

El modelo está dividido por rutinas de procesamiento las cuales se detallan en la Figura 12 y Cuadro 17.

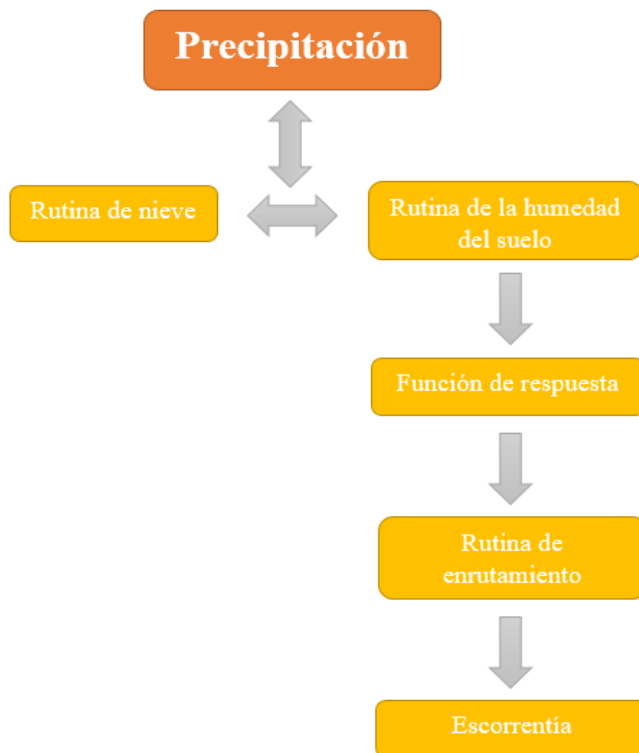


Figura 12. Estructura del modelo HBV light.

Cuadro 17. Estructura del modelo.

Submodelo	Datos de entrada	Datos de salida
Rutina de nieve	Precipitación Temperatura	Paquete de nieve Deshielo
Rutina de suelo	Evaporación potencial Precipitación Deshielo	Humedad del suelo Recarga de aguas subterráneas Evaporación
Función de respuesta	Recarga de aguas subterráneas Evapotranspiración potencial	Nivel de aguas subterráneas Escorrentía
Rutina de enrutamiento	Escorrentía	Escorrentía simulada

3.3.1.2.1 Rutina de nieve

Esta rutina utiliza los siguientes parámetros de cálculo:

$$CFmax = \text{Grado de factor día} \left(\frac{mm}{^{\circ}C \text{ día}} \right)$$

CFR = Coeficiente de congelación

TT = Límite de temperatura (°C)

Se asumen los siguientes supuestos:

1. Acumulación de la temperatura como nieve, si la temperatura es menor a TT donde TT esta normalmente cerca de 0° C.
2. El deshielo comienza si las temperaturas están por encima del TT calculado por el método simple de grado de factor día.

$$Deshielo = CFmax (T - TT)$$

El valor de CFmax varía normalmente entre 1,5 y 4 mm/ °C día, con valores bajos para áreas boscosas. Aproximadamente los valores de 2 y 3,5 pueden usarse para CFmax en áreas boscosas y paisajes abiertos.

El manto de nieve retiene agua derretida hasta que la cantidad excede cierta porción (CWH, usual 0.1) del equivalente del agua del manto de nieve. Cuando la temperatura disminuye de bajo de TT, esta agua derretida vuelve a congelarse otra vez.

3.3.1.2.2 La humedad del suelo rutina

Para el cálculo de la humedad del suelo se utilizan los siguientes parámetros:

FC = almacenamiento máximo de humedad del suelo (mm)

LP = Valor de humedad del suelo por encima del cual ET_{act} llega a ET_{pot} (mm)

$BETA$ = Parámetro que determina la contribución a la escorrentía por lluvia o deshielo (-)

La Figura 13 muestra la relación de la contribución de la lluvia por deshielo con respecto a la humedad del suelo. Conforme aumenta la lluvia se almacena el agua en el suelo y después de la máxima capacidad de almacenamiento se da una recarga de las aguas subterráneas.

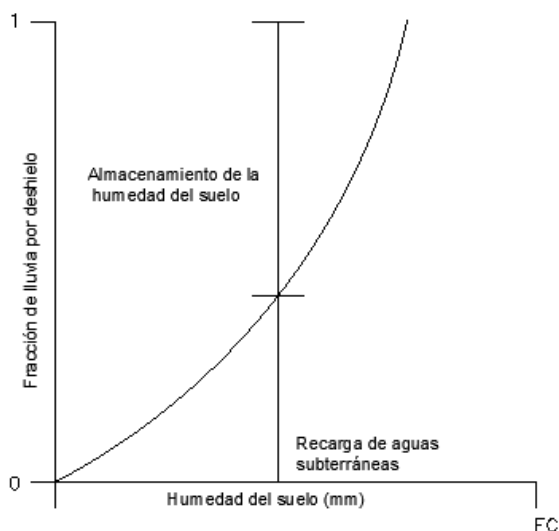


Figura 13. Contribuciones de la lluvia o deshielo al almacenamiento de humedad del suelo y a la zona de aguas subterráneas superiores.

$$\frac{recharge}{P(t)} = \left(\frac{SM(t)}{FC}\right)^{BETA}$$

Ecuación 3

La Figura 14 muestra la relación de la evapotranspiración potencial y la humedad del suelo, la cual aumenta hasta capacidad de campo. Después de este valor la evapotranspiración tiende a mantenerse constante.

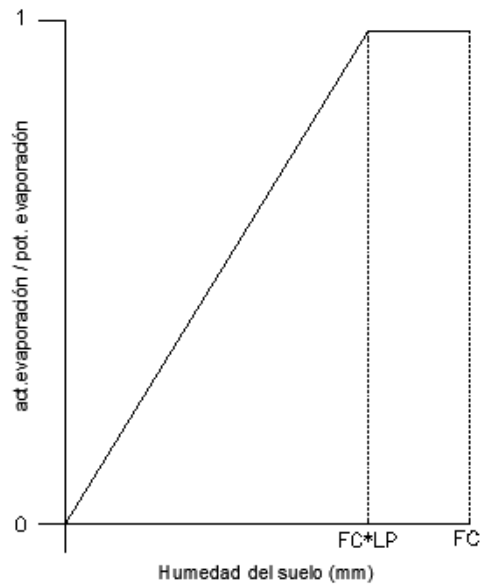


Figura 14. Reducción de la evaporación potencial según el almacenamiento de humedad del suelo

3.3.1.2.3 Función de respuesta

La función de respuesta utiliza el concepto del Depósito lineal simple. El modelo de un solo depósito lineal es una descripción simple de una cuenca donde la escorrentía $Q(t)$ en el tiempo t es se supone que es proporcional al almacenamiento de agua $S(t)$ (Figura 15).

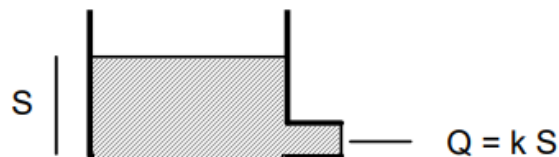


Figura 15. Depósito lineal simple

Una realización de un solo depósito lineal es una caja con una salida porosa, obteniendo así la ecuación de la ley de Darcy:

$$Q(t) = k \times S(t) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

S: Almacenamiento (mm)

Q: Flujo de salida (mm/d)

t: Tiempo (d)

k: Coeficiente de almacenamiento (o recesión) (d^{-1})

Balance agua de una cuenca:

$$P(t) = E(t) + Q(t) + \frac{d \times S(t)}{dt}$$

Ignorando la precipitación P(t) y evapotranspiración E(t) se obtiene:

$$0 = Q(t) + \frac{d \times S(t)}{dt}$$

Junto con la ecuación de la Ley de Darcy se obtiene la ecuación diferencial con la solución de función:

$$0 = \frac{d \times Q(t)}{dt \times k} + Q(t)$$
$$Q(t) = Q(t_0) \times e^{(t_0-t) \times k}$$

La Figura 16 muestra el resumen de la rutina de respuesta del modelo HBV:

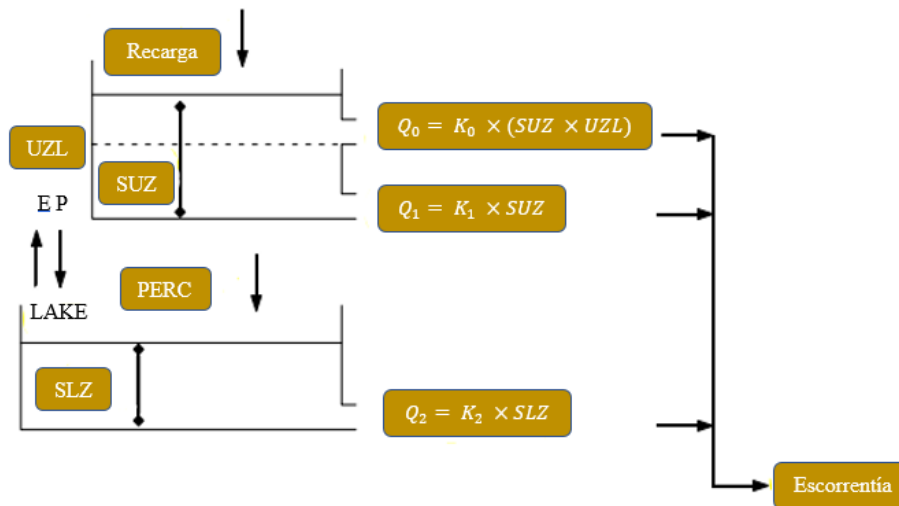


Figura 16. Esquema de la respuesta del modelo HBV light.

Donde:

Recarga: Entrada desde la rutina del suelo (mm/d)

SUZ: Almacenamiento en la zona superior (mm)

SLZ: Almacenamiento en la zona inferior (mm)
 UZL: Parámetro de umbral (mm)
 PERC: Máxima percolación a la zona inferior (mm/d)
 Ki: Coeficiente de recesión (d^{-1})
 Qi: Componente de escorrentía (mm/d)

3.3.1.2.4 Análisis de recesión (enrutamiento)

Si $\ln Q$ se representa la función del tiempo durante un período seco, las pendientes del hidrograma a diferentes valores de escorrentía proporcionan las primeras estimaciones del parámetro de función de respuesta (Figura 17).

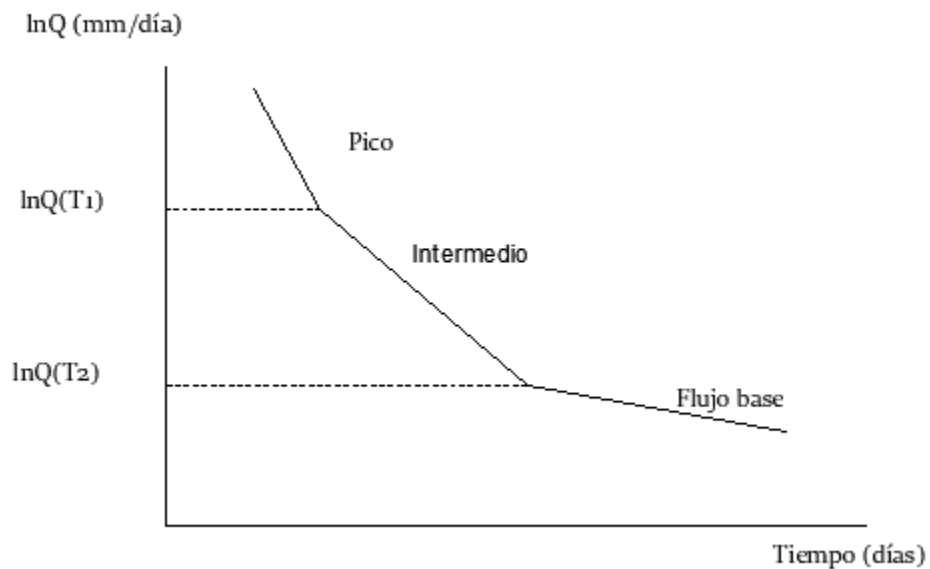


Figura 17. Forma esquemática de la recesión en relación con los diferentes parámetros.

Pendiente de la recesión:

Picos: $K_0 + K_1 + K_2$

Intermedio: $K_1 + K_2$

Flujo de base: K_2

4. Resultados y Discusión

4.1 Fisiografía de la cuenca

La cuenca del río Birrís tiene un área de 83,5 km² y un perímetro de 51 km, se encuentra entre las coordenadas 551 000 – 561 000 Este y 205 000 – 218 000 Norte basado en las coordenadas Lambert Norte Costa Rica. La cuenca del río Birrís es alargada lo que implica que en la región existe una menor tendencia a las crecidas. La cuenca tiene una alta densidad de drenaje la cual corresponde a 2,87 km/km² y el orden de la cuenca es de 6. Esto significa la cuenca presenta una respuesta rápida a los eventos de precipitación ya que el agua que corre por escorrentía drena rápidamente por los afluentes de la cuenca (Figura 18). Además tiene una altitud media de 2090 m.s.n.m un índice de forma de 0,98 y un índice de compacidad de 1,97. Su pendiente promedio es de 11%.

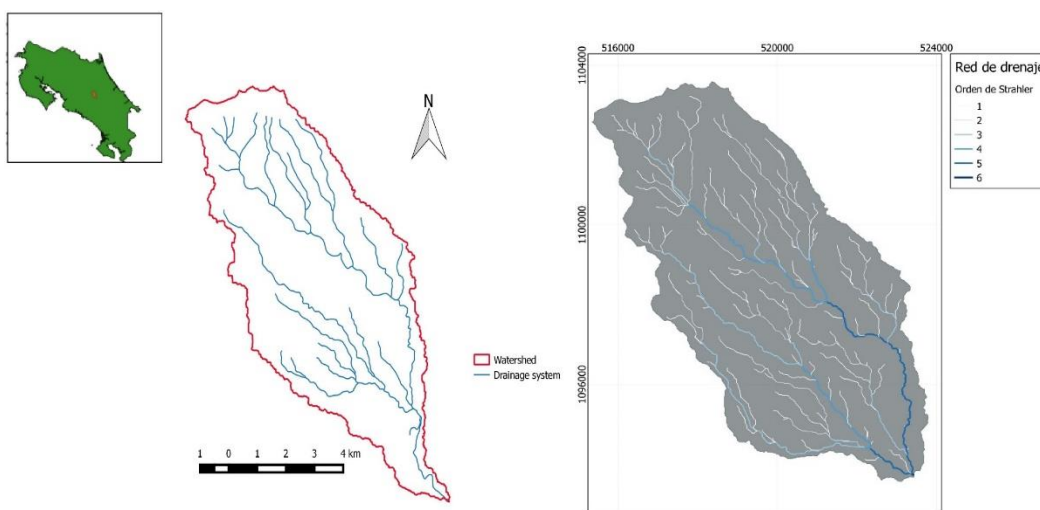


Figura 18. Red de drenaje y orden de la cuenca del río Birrís.

La curva hipsométrica se obtuvo de graficar el área relativa en la abscisa versus la elevación en la ordenada hasta el puesto II de Jasec. El área relativa corresponde a la razón del área sobre la línea de contorno entre el área total de la cuenca. La Figura 19 muestra que la cuenca se encuentra en un estado compuesto, donde aproximadamente un 50% de la cuenca (parte alta) se encuentra en un estado joven con alta producción de sedimentos y en la otra mitad de la cuenca se deposita el sedimento.

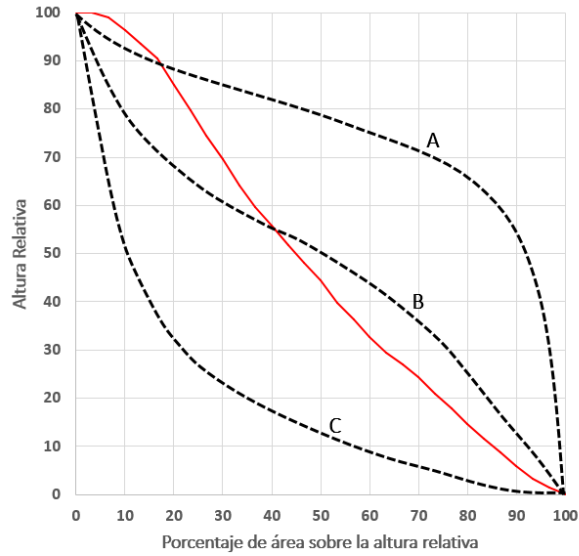


Figura 19. Hipsometría de la cuenca del río Birrís. Las etiquetas corresponden a A: cuenca en estado joven; B: cuenca madura en equilibrio; C: Cuenca vieja, sedimentaria.

La Figura 20 muestra la frecuencia de altitudes de la cuenca del río Birrís que va desde los 3400 msnm en las faldas del Volcán Irazú hasta los 1300 msnm en el puesto II del embalse de Jasec. Las elevaciones más frecuentes se encuentran en el rango de 1626 a 1990 msnm.

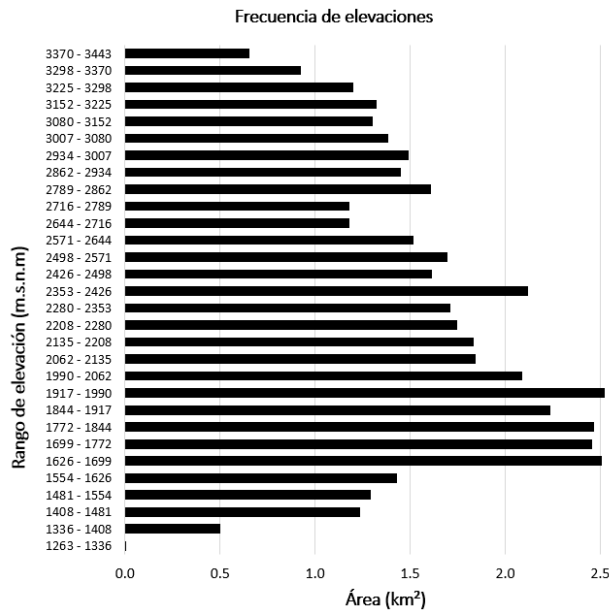


Figura 20. Frecuencia de altitudes de la cuenca del río Birrís.

La Figura 21 muestra el perfil del cauce Birrís. El cauce inicia a más de los 3000 msnm y se extiende con una pendiente promedio del 14%. Esta característica es propia de los cauces de montaña, turbulentos y con pendientes altas. Alrededor de los 1500 msnm el cauce disminuye su pendiente. Este cambio de pendiente genera una diferencia en la velocidad del flujo y la capacidad de transporte de sedimentos.

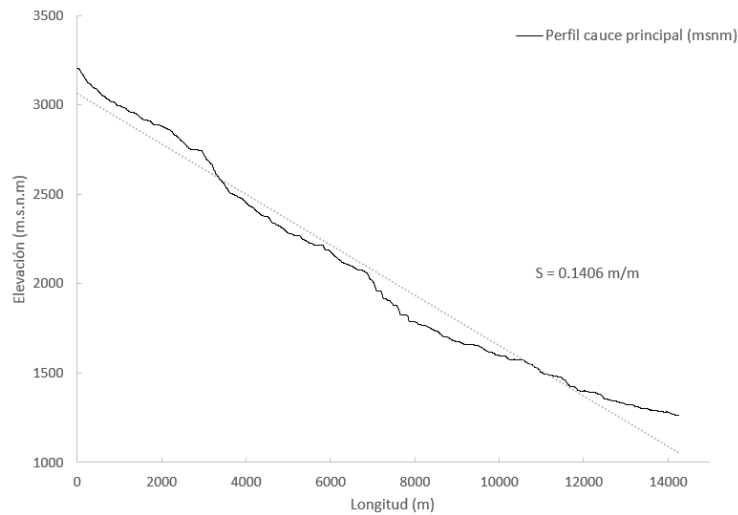


Figura 21. Perfil longitudinal del cauce del río Birrís.

4.2 Condición de la biota del cauce

El Cuadro 18 presenta el resumen de los tres estudios biológicos efectuados en el río Birrís. Todos los estudios coinciden en que existe una alta variabilidad de hábitats sin embargo no existe una diversidad de macro-invertebrados suficiente que sean indicadores de aguas limpias. Los informes completos se encuentran en el Anexo 5.

Cuadro 18. Resumen de los resultados obtenidos de los informes de indicadores biológicos del río Birrís.

Fecha	Organismos encontrados	Organismos indicadores	Organismos indicadores de caudal	Categoría de calidad de agua
Marzo y Abril-2017	Larvas de moscas y mosquitos Dípteros (Similium) Mosquitos Quironómidos Larvas de escarabajos Caracoles	De aguas contaminadas Resistentes a la contaminación	Ninguno	De mala calidad-contaminadas
Julio-2017	Bacterias Anfípodos Lombrices <i>Tricorythodes</i> <i>Sanguijuelas</i> <i>Escarabajos</i>	De aguas contaminadas Resistentes a la contaminación	Ninguno	Muy mala, extremadamente contaminadas Mala calidad, muy contaminadas
Nov.-2017	Ciempíes Escarabajos	De aguas contaminadas Resistentes a la contaminación	Ninguno	Mala, muy contaminada Muy mala, extremadamente contaminadas

El informe biológico final (Anexo 5) provee el siguiente resumen (Cuadro 19):

Cuadro 19. Valores de los índices BMWP-CR (Calidad de Agua) y cantidad de individuos por sitio de muestreo y por muestreo.

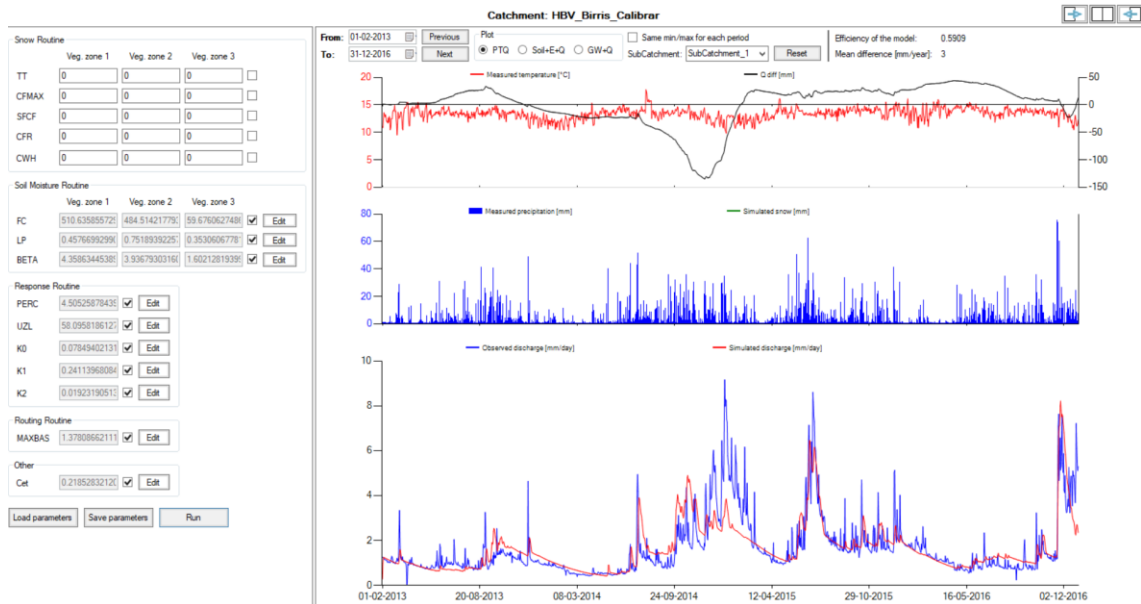
Sitio	Primer Muestreo (Marzo)		Segundo Muestreo (Julio)		Tercer Muestreo (Noviembre)	
	BMWP- CR	Individuos Totales	BMWP- CR	Individuos Totales	BMWP- CR	Individuos Totales
Capellades	42	324	8	3	0	0
Puente, Río Birrís	43	145	22	12	28	89
Puente, Río Pacayas	19	139	4	11	9	3
Central JASEC	62	150	18	8	16	6

BMWP corresponde al método de inventario cualitativo de la presencia de invertebrados bentónicos a nivel de familia y corresponde a la calidad del agua. BMWP ≥ 121 Calidad muy buena; BMWP 101-120 Buena; BMWP 61-100 Aceptable; BMWP 36-60 Dudosa; BMWP 16-35 Mala; BMWP ≤ 15 Muy mala.

Según el Cuadro 19, el informe biológico (Anexo 5) hace referencia a la siguiente explicación de la mala calidad del agua del río Birrís: “la disminución en la cantidad de organismos y en la diversidad de géneros encontrados disminuye a medida que avanza la estación lluviosa. A medida que las condiciones lluviosas aumentan, aumentan también la corriente en los cuerpos de agua, la escorrentía, el contenido de sedimentos y la cantidad de materia orgánica disuelta, por lo que este patrón es de esperar en nuestros ecosistemas lóticos. El año 2017 presentó precipitaciones intensas y prolongadas a lo largo de la estación lluviosa, en contraposición a los años anteriores que presentaron condiciones de sequía. El impacto de este incremento inusual en las precipitaciones puede haber contribuido a que la disminución de la cantidad y diversidad de invertebrados acuáticos fuera más marcada a lo largo de la estación lluviosa. Sin embargo, al ser este el primer estudio de este tipo que se lleva a cabo en los cuerpos de agua seleccionados, no se pueden hacer suposiciones robustas al respecto y se deben utilizar estos datos como una línea de base. Los informes indican la importancia de tomar en cuenta la reducción de la fauna acuática debido a los efectos de las cargas de plaguicidas, fertilizantes y otras sustancias químicas asociadas con las actividades agropecuarias. La presencia de partículas microscópicas antibióticos y otros contaminantes emergentes son factores que vienen a hacer más complejo el perfil de contaminación de los cuerpos de agua y a promover la disminución de la biodiversidad de los sistemas lóticos y lénticos. Es importante considerar que las represas se convierten en reservorios de todas estas sustancias, y la liberación de sedimentos de las mismas exponen de manera exagerada a estos contaminantes a los ecosistemas y comunidades humanas que se encuentran río abajo de estas construcciones”.

4.3 Método hidrológico para la determinación del caudal ambiental

La Figura 22 muestra los resultados de la calibración del modelo hidrológico para el periodo 2013 al 2016 con un coeficiente de correlación de 0,74.



Calibración del Modelo Hidrológico

Coefficiente de Correlación = 0.86
 Coeficiente de Nasc Sutcliffe = 0.76

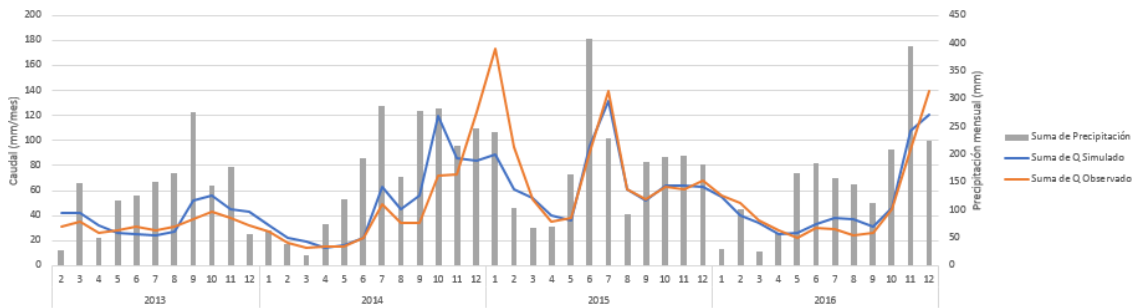
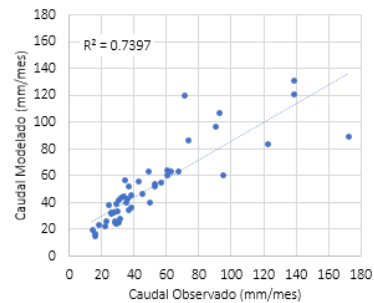


Figura 22. Calibración del modelo.

Los parámetros de calibración obtenidos en la Figura 22 se utilizaron para obtener el caudal simulado del periodo 2007 al 2017 que se observan en la Figura 23. De los resultados teóricos

se observa que el año con mayor escurrimiento anual corresponde al 2008, con mayores picos 2007, 2008, 2010, 2011, 2015 y 2016. Los menos abundantes son el 2012, 2013 y 2014. Esto puede ocasionar variabilidad en los datos medios de caudal sobre todo en los meses donde existen picos de caudal en los años mencionados.

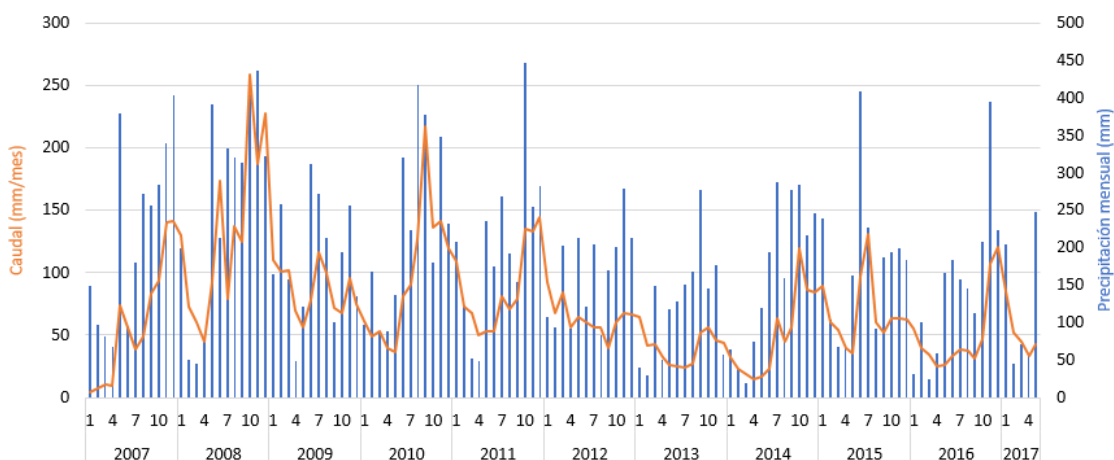


Figura 23. Simulación de caudales para el periodo 2007 al 2017.

4.4 Análisis del régimen fluvial del río Birrís y determinación del caudal ambiental por medio del método de índices de curvas de duración

La variabilidad natural se puede establecer entre los percentiles 25 y 75 (Gómez Balandra et al., 2015) (Figura 24). El comportamiento estadístico de los datos muestra las menores diferencias en los meses de estiaje de enero a abril, mientras que durante los meses más lluvia, de mayo a diciembre, los coeficientes de variación se incrementan. Esto se debe probablemente a la alternancia de años secos y húmedos (Figura 23). La Figura 25 muestra los promedios diarios mensuales del río Birrís. En esta se muestra con mayor claridad los meses de estiaje y avenidas con una gran variabilidad en los meses entre mayo y diciembre.

Estadístico (mm/día)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Max	6.52	4.94	4.53	2.63	8.66	8.54	6.15	8.74	8.13	11.83	9.50	9.77
Q75	3.24	2.49	2.13	1.66	1.65	2.82	3.35	3.01	3.10	4.35	4.32	4.33
Q50	2.62	2.06	1.69	1.33	1.20	1.78	2.27	1.94	1.96	2.24	3.00	2.65
Q25	1.90	1.50	1.29	1.02	0.88	1.06	1.41	1.42	1.40	1.80	1.82	2.04
Min	0.92	0.72	0.54	0.44	0.42	0.52	0.71	0.79	0.99	0.96	1.25	1.20
Desviación Estandar	1.07	0.77	0.81	0.51	1.13	1.77	1.26	1.46	1.90	2.30	1.90	1.91
Coefficiente de variación	0.40	0.38	0.45	0.37	0.78	0.77	0.52	0.62	0.71	0.68	0.55	0.56

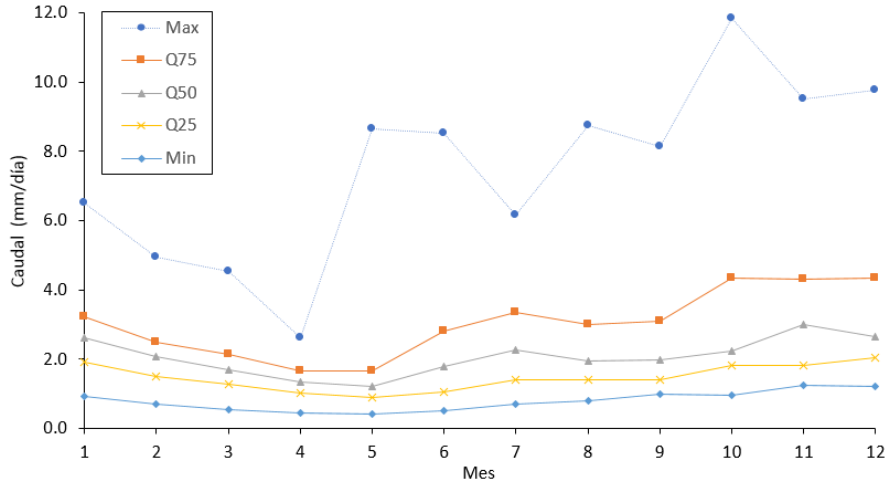


Figura 24. Estadísticos de caudales para el periodo 2007 al 2017.

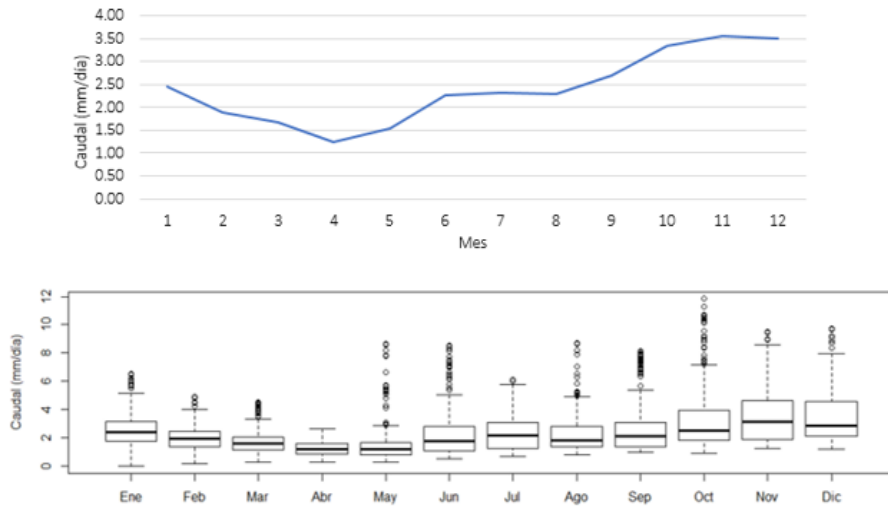


Figura 25. Estadísticos de caudales para el periodo 2007 al 2017.

La Figura 26 muestra la curva media de duración de caudales (CDC) donde se observa la variabilidad de los caudales de acuerdo a sus excedencias. En ella se observa que el Q50

corresponde a una lámina de escorrentía de 2 mm/día, lo que significa que el 50% del tiempo (en el año) el caudal específico de 2 mm/día es igualado o excedido. El Q90 corresponde a 1 mm/día y el Q95 corresponde a 0,8 mm/día.

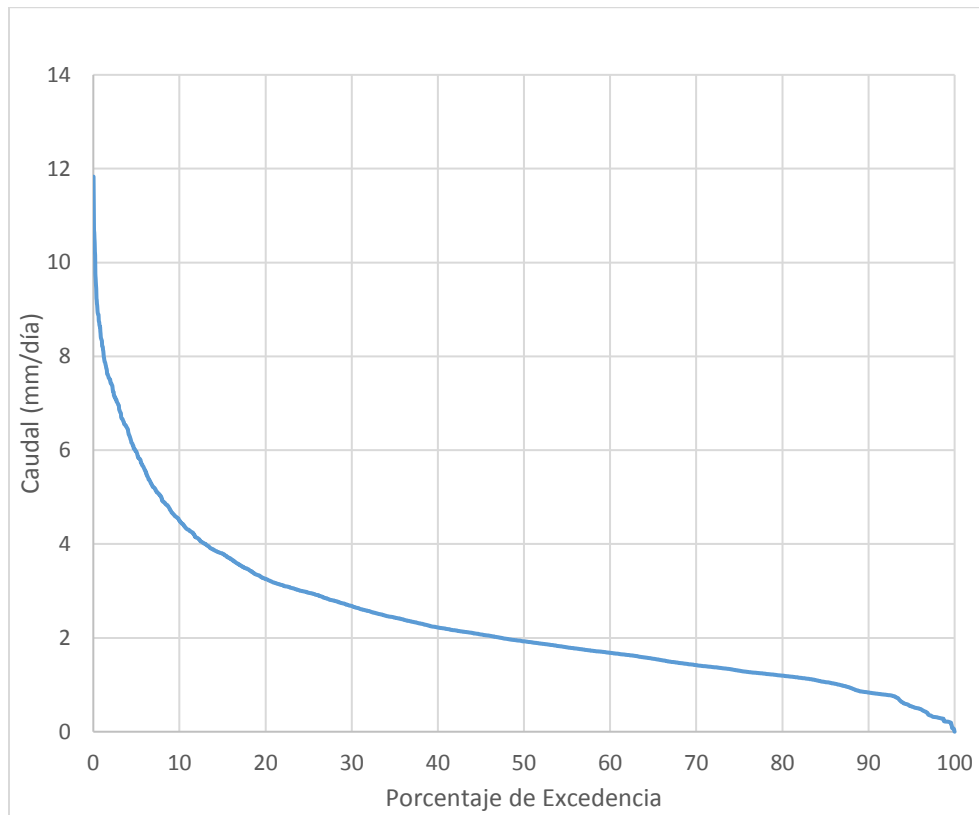


Figura 26. Curva de duración de caudales (CDC) para el periodo 2007 al 2017.

Debido a que el régimen anual de caudales es un indicador del comportamiento fluvial, la Figura 27 muestra la CDC para cada mes durante el periodo de 10 años (2007 al 2017). Con esto se muestra la variabilidad de los caudales a lo largo del año y se justifica la escogencia de valores de caudal ambiental para cada mes y no uno puntual para todo el año.

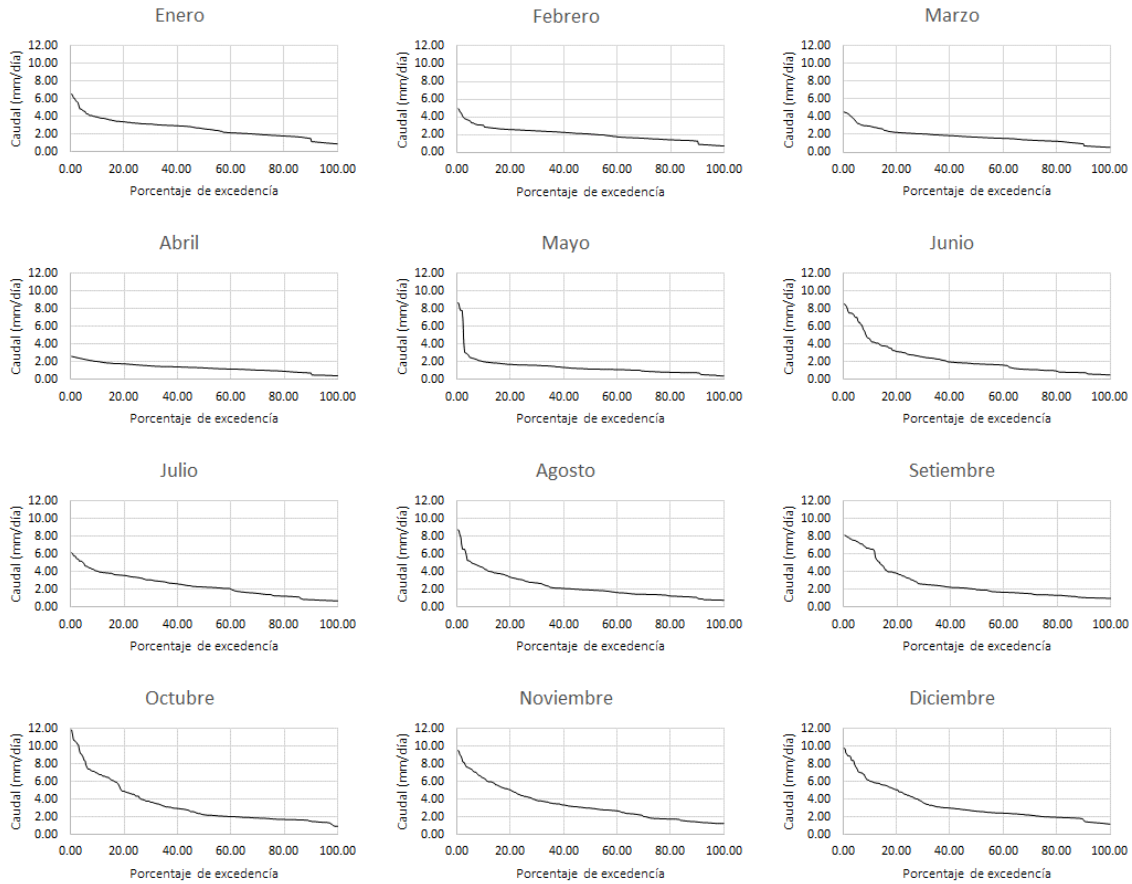


Figura 27. Curva de duración de caudales (CDC) por mes para el periodo 2007 al 2017.

Debido a que la cuenca del río Berrís mantiene actualmente concesionado el total del caudal que en ella se genera, se propone el rango de excedencias de caudal de Q85 a Q95 como caudal ambiental, la cual estará en función de la demanda mensual. La Figura 28 muestra el comportamiento medio mensual de las excedencias de caudales. El Cuadro 20 muestra el rango de los valores estadísticos medios de caudal ambiental que deben de ser medidos en puesto II de JASEC para cumplir con los requerimientos de caudal ambiental propuestos.

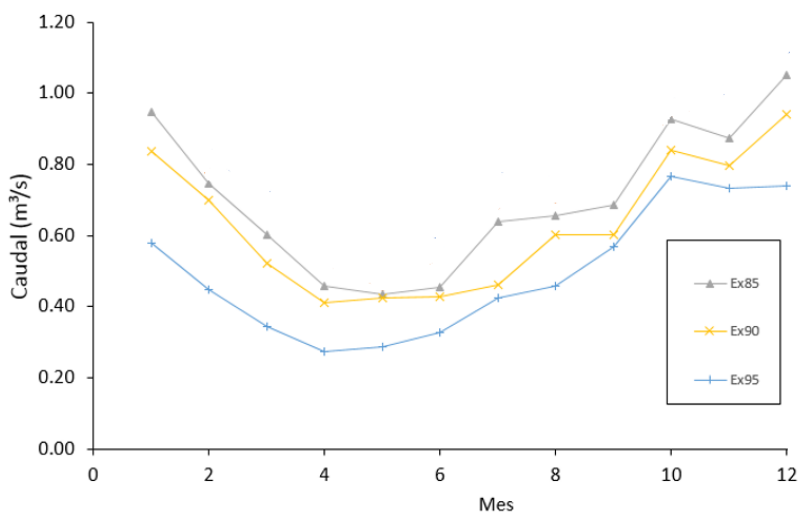


Figura 28. Curva de duración de caudales (CDC) media mensual para los 12 meses del año.

Cuadro 20. Valores medios mensuales estadísticos de las excedencias de caudales que se recomiendan para caudal ambiental en la cuenca del río Birrís.

Mes	Q85	Q90	Q95
Enero	0,95	0,84	0,58
Febrero	0,75	0,70	0,45
Marzo	0,60	0,52	0,34
Abril	0,46	0,41	0,27
Mayo	0,44	0,42	0,29
Junio	0,45	0,43	0,33
Julio	0,64	0,46	0,42
Agosto	0,66	0,60	0,46
Setiembre	0,68	0,60	0,57
Octubre	0,93	0,84	0,76
Noviembre	0,87	0,80	0,73
Diciembre	1,05	0,94	0,74

Caudales en m³/s que son excedidos en 85% (Q85), 90% (Q90) y 95% (Q95) del tiempo durante el mes correspondiente.

5. Conclusiones y recomendaciones

1. El estudio determinó el régimen teórico (estadístico) de los caudales ya que debido a que el flujo del río Birrís se encuentra concesionado en su totalidad no fue posible establecer la condición de su flujo natural.
2. Se analizaron los parámetros hidrológicos y se determinó la condición biológica del cauce. La condición biológica del cauce indicó que no era posible establecer ninguna especie indicadora en el río para determinar el caudal ambiental por algún medio que incluya la biota. El grado de contaminación del río es alta para la reproducción de especies.
3. El grado de alteración del río no permite la aplicación de otra metodología que no sea la hidrológica.
4. El método utilizado para el cálculo del caudal ambiental se basó en el índice de curvas de duración (CDC) y se propuso un caudal ambiental dentro de un régimen de caudales entre Q85 y Q95.

Dentro de las principales recomendaciones se tienen:

1. Instar al MINAE y al Ministerio de Salud a intervenir la cuenca para recuperar la calidad de las aguas y así promover la reaparición de especies acuáticas.
2. Reducir las concesiones para promover un flujo óptimo de caudal ambiental que se pueda aproximar a un Q50.

6. Agradecimientos

Los investigadores desean agradecer a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del ITCR por el apoyo económico para realizar este proyecto. A la Dirección de Agua del MINAE por la cooperación tanto de información, económica y de personal para llevar este proyecto a un nivel de interés nacional. A la UNESCO por el apoyo en la elaboración de la propuesta metodológica. A la Dra. Laura Chavarría de la Escuela de Biología por el apoyo en el análisis del estudio biológico, al Ing. Pablo Chacón y Andrey Aguilar por la valiosa colaboración en la toma de datos de campo y procesamiento de la información.

Referencias

- Alonso-EguíaLis, P.E. (ed.), 2007. Requerimientos para Implementar el Caudal Ambiental en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Alianza World Wildlife Fund/Fundación Gonzalo Río Monte, Programa Hidrológico Internacional, Mexico.
- Armour, C.L., Taylor, J.G., 1991. Evaluation of the Instream Flow Incremental Methodology by U . S . Fish and Wildlife Service Field Users. *Fisheries* 16, 36–43. doi:10.1577/1548-8446(1991)016<0036
- Arthington, A., Tharme, R., Brizga, S., Pusey, B., Kennard, M., 2004. Environmental flow assessment with emphasis on holistic methodologies, in: *Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries*.
- Chaves, A., Krasovskaia, I., Gottschalk, L., 2006. Environmental demands for sustainable regulation schemes in the humid tropics, in: *Fifth FRIEND World Conference*. IAHS Publ. 308, Havana, Cuba, pp. 1–4.
- Chaves, A., Picado, J., Krasovskaia, I., Gottschalk, L., 2010. Linking annual cycles of ecological indicators with statistical flow descriptors for environmental flow assessment, in: *Sixth World FRIEND Conference*. IAHS Publ. 340, 327-334, Fez, Morocco.
- Comisión de Caudal Ambiental Costa Rica, 2018. Guía de selección de metodologías para la estimación del caudal ambiental en Costa Rica. Costa Rica.
- Consuegra Martínez, C., 2013. Síntesis Metodológica para la Obtención de Caudales Ecológicos (Qe), Resultados y Posibles Consecuencias. Tesis de Posgrado en Ingeniería Civil, Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá.
- Gómez Balandra, M.A., Saldaña Fabela, M. del P., Rodríguez Torres, S., 2015. Importancia de los Componentes del Caudal Ecológico para el Aprovechamiento del Río Omitlán, Guerrero, in: *1er Congreso Iberoamericano Sobre Sedimentos Y Ecología*. Querétaro, México, 21-24 Julio, pp. 21–24.
- Guevara Torres, E.T., Rodríguez Pérez, C.E., 2013. Caudales ambientales, necesidad de su reconocimiento y lineamientos básicos para su regulación en Costa Rica. Universidad de Costa Rica.
- Krasovskaia, I., Gottschalk, L., 2014. Determinación de un caudal adaptativo. Informe final.
- Lianes, E., Marchamalo, M., Roldán, M., 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agron. Costarric.* 33, 217–235.
- Magdaleno, F., 2009. Manual técnico de cálculo de caudales ambientales. Canales y Puertos Colegio de Ingenieros de Caminos, España.
- Mayo Rustarazo, M., 2000. Determinación de Regímenes de Caudales Ecológicos Mínimos, Adaptación del Método IFIM-PHABSIM y aplicación a los Ríos Españoles. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.

- Rodríguez Torres, S., 2012. Caracterización Ambiental y Determinación de Caudal Ecológico en la Cuenca del Río Verde, Oaxaca. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Santacruz de León, G., Aguilar-Robledo, M., 2009. Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant. *Hidrobiológica* 19, 25–32.
- Seibert, J., 2005. HBV Light Model [WWW Document]. URL <https://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/Services/HBV-Model.html>
- Servicio de Evaluación Ambiental, 2016. Guía Metodológica para Determinar el Caudal Ambiental para Centrales Hidroeléctricas en el SEIA. Chile.
- Tharme, R.E., 2003. A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers. *River Res. Appl.* 19, 397–441.

Anexos

Anexo 1: Convenios TEC-MINAE y TEC-JASEC

Anexo 2: Plan de trabajo con la Dirección de Agua

Anexo 3: Logística del primer taller de validación: agenda, presentación y asistencia

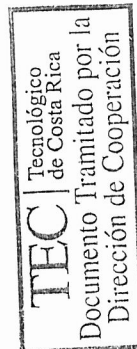
Anexo 4: Propuesta metodológica de la Comisión de Caudal Ambiental

Anexo 5: Informes de los estudios biológicos de los indicadores de la cuenca del río Birrís

Anexo 6: Imágenes de las características de la cuenca del río Birrís

CARTA DE ENTENDIMIENTO ENTRE EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA Y EL MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA

Entre nosotros, el **MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA** institución pública del estado costarricense, regida por las leyes de Costa Rica y sometida al derecho público, domiciliada en San José, República de Costa Rica, con cédula de persona jurídica número 2-100-042014, representada en este acto por **EDGAR E. GUTIÉRREZ ESPELETA**, mayor, casado, Doctor en Biometría Forestal, portador de la cédula de identidad número 1-453-822 vecino de San Pedro de Montes de Oca, provincia de San José, actuando en su condición de Ministro, con facultades legales amplias y suficientes para el acto objeto de este instrumento; en adelante y para efectos de este convenio se denominará "**MINAE**", y el "**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA** en adelante denominado "**TEC**", con sede en Cartago, Costa Rica, número de cédula jurídica cuatro mil-cero cuarenta y dos ciento cuarenta y cinco-cero siete, representado por **JULIO CÉSAR CALVO ALVARADO**, mayor, casado, Ingeniero Forestal, vecino de Heredia, con cédula de identidad número - uno- seiscientos treinta y nueve- quinientos cuarenta y uno, en su calidad de **RECTOR**; según Asamblea Plebiscitaria del día veintiuno de mayo de dos mil quince; publicado en La Gaceta Número ciento treinta y cinco del mismo año; suscriben el presente Convenio Específico de Cooperación, sujeto a las consideraciones y cláusulas siguientes:



CONSIDERANDO:

1. Que existe un Convenio Marco de Cooperación entre el "MINAE" y el "TEC", suscrito en fecha 12 de junio del 2006.
2. Que conforme a la Cláusula Quinta del Convenio Marco de Cooperación suscrito entre el Instituto Tecnológico de Costa Rica y el Ministerio de Ambiente y Energía, se establece la posibilidad de que para cada actividad, programa o proyecto que se genere bajo el marco del convenio, se podrá suscribir una Carta de Entendimiento Específica amparada al Convenio Marco.
3. Que el TEC a través de la Escuela de Ingeniería Agrícola cuenta con un proyecto de investigación enfocado al estudio de metodologías para la determinación de caudal ambiental para las cuencas hidrográficas de Costa Rica.
4. Que el TEC, específicamente en la Escuela de Ingeniería Agrícola, cuenta con un grupo de profesionales expertos y con experiencia en el campo la investigación en temas del recurso hídrico.
5. Que la Dirección de Agua (DA), es una Dirección del MINAE rector en materia de gestión integrada del recurso hídrico.
6. Que el TEC y el MINAE (a través de la DA), comparten objetivos e intereses comunes a favor de la identificación de procedimientos para la definición y determinación más apta del caudal ambiental para las cuencas hidrográficas de Costa Rica. Que este procedimiento debe ser definido para las condiciones de Costa Rica. Que este procedimiento contribuya al aprovechamiento de los recursos hídricos de una forma integral, asegurando la sostenibilidad del desarrollo económico, social y ambiental.



[Handwritten signature]

V6.Bo

POR TANTO:

Convenimos en suscribir la presente Carta de Entendimiento, que se registrará por las cláusulas siguientes:

PRIMERA: DEL OBJETO

El objeto de la presente Carta, consiste en seleccionar tres metodologías de caudal ambiental existentes, analizarlas y validarlas en tres distintas cuencas del país.

SEGUNDA: ALCANCE-ETAPAS

El desarrollo del proyecto, consiste en 3 etapas de dos años cada una, con alcances específicos, los que se detallan a continuación:

- Etapa 1: Validación de una metodología hidrológica de cálculo de caudal ambiental, en la cuenca del río Birrís.
- Etapa 2: Validación de una metodología hidrobiológica de cálculo de caudal ambiental en la cuenca del río Pejibaye. Ambas cuencas de las etapas 1 y 2 ubicadas en la unidad hidrológica Caribe.
- Etapa 3: Selección y validación de una metodología holística de caudal ambiental, en la cuenca del río Tempisque. Dicha cuenca se ubica en la Unidad Hidrológica Tempisque.

TERCERA: ENTREGABLES.

Los entregables contemplados en la presente carta son:

Etapa 1.

- Descripción del procedimiento seguido para la selección de la metodología.
- Descripción detallada del proceso seguido para validar la metodología.
- Comunicar los resultados obtenidos durante el proceso de validación.
- Régimen de Caudal ambiental requerido en los puntos de control.
- Propuesta de un manual de uso de la metodología aplicada incluyendo los criterios y paso a seguir para su aplicación.

Etapa 2.

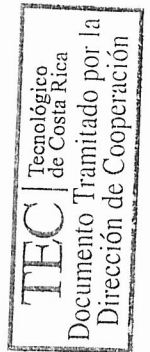
- Descripción del procedimiento seguido para la selección de la metodología.
- Descripción detallada del proceso seguido para validar la metodología.
- Comunicar los resultados obtenidos durante el proceso de validación.
- Régimen de Caudal ambiental requerido en los puntos de control.
- Propuesta de un manual de uso de la metodología aplicada incluyendo los criterios y paso a seguir para su aplicación.

Etapa 3.

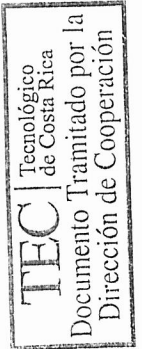
- Descripción del procedimiento seguido para la selección de la metodología.
- Descripción detallada del proceso seguido para validar la metodología.
- Comunicar los resultados obtenidos durante el proceso de validación.
- Comunicar los resultados obtenidos durante el proceso de validación.
- Régimen de Caudal ambiental requerido en los puntos de control.
- Propuesta de un manual de uso de la metodología aplicada incluyendo los criterios y paso a seguir para su aplicación.

CUARTA: COMPROMISOS DEL TEC.

El TEC a través de la Escuela de Ingeniería Agrícola ejecutará las siguientes actividades:



- a. Revisión exhaustiva de las metodologías actuales para la determinación de caudal ambiental y propuesta de tres metodologías de cálculo para las Unidades Hidrológicas de Costa Rica.
- b. Determinación del comportamiento hidrológico de las cuencas piloto: para esto se recolectarán datos hidrometeorológicos, de uso de la tierra, tipos de suelo, topografía. Se instalarán equipos en los ríos para monitorear caudales durante el periodo en estudio.
- c. La recolección, almacenamiento y procesamiento de datos obtenidos mediante el monitoreo manual y las estaciones implementadas.
- d. Recolección, procesamiento y análisis de la información biológica de especies presentes en la zona de estudio para la metodología hidrobiológica.
- e. Recolección, procesamiento y análisis de la información hidráulica de la zona en estudio para la aplicación de la(s) metodología(s).
- f. Recolección, procesamiento y análisis de la información socioeconómica y ambiental de la zona en estudio, para la aplicación de la metodología correspondiente.
- g. Evaluación de la metodología en las cuencas piloto.
- h. Entrega de un informe al MINAE conforme lo estipulado en la cláusula novena.



QUINTA: COMPROMISOS DEL MINAE.

El MINAE a través de la Dirección de Agua se compromete a:

- a. Aportar recursos económicos requeridos para completar actividades del proyecto. El aporte y ejecución de los fondos, está sujeto a las directrices que rigen la materia, así como a la disponibilidad de recursos.
- b. Realizar los procesos de compra de bienes requeridos durante la ejecución del proyecto. Este punto está condicionado a la disponibilidad de los recursos.
- c. Aportar recurso humano profesional requerido para el proyecto, previa coordinación entre las partes.
- d. Facilitar el transporte de personal y equipo técnico de proyecto a los sitios de estudios, previa coordinación entre las partes.
- e. Gestionar la adquisición de datos hidrometeorológicos con el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Servicio Nacional de Agua subterránea, riego y Avenamiento (SENARA), Instituto Costarricense de Acueductos y alcantarillados (AYA), empresa privada, academia, y otras instituciones u organizaciones que posean información de interés.
- f. Gestionar la adquisición de información topográfica con las instituciones correspondientes.
- g. Aportar la documentación oficial requerida, para la identificación del personal de proyecto durante las labores de campo y solicitud de permisos.



SEXTA: PLAZO DE VIGENCIA

El plazo de vigencia de esta Carta de Entendimiento será de 6 años a partir de la firma de la misma y podrá ser prorrogada, si así lo desean las partes, mediante adenda a esta, seis meses antes de su vencimiento.

SÉTIMA: COSTOS COMPARTIDOS

Para el desarrollo e implementación del proyecto, el TEC, por medio de la Escuela de Ingeniería Agrícola, aportará el apoyo docente, estudiantes asistentes, practicantes de grado y/o postgrado, y

personal administrativo que demande el proyecto, el espacio físico, las redes informáticas, y equipos terrestres de medición de parámetros hidrometeorológicos. También facilitará a la DA, la información técnica requerida para el proceso de adquisición e instalación de equipo técnico; todo de acuerdo a las posibilidades y la normativa institucional.

La DA aportará al proyecto un caudalímetro ultrasónico, un perfilador acústico para batimetría (Steampro ADCP), 15 sensores móviles para medir nivel de agua en los cauces de estudio, tres pluviómetros con minidatalogger, para registro de la lluvia dentro de la cuenca (alta, media y baja), estación meteorológica, con sensor de lluvia, temperatura, humedad relativa, viento, barómetro y piranómetro. También la DA debe facilitar un espacio para el almacenamiento de los datos recolectados producto de las mediciones y del monitoreo, además, proveer alguna herramienta para el procesamiento de datos; todo esto de acuerdo a las posibilidades presupuestarias y la normativa vigente.

El equipo adquirido durante el proyecto, estará al servicio de las partes interesadas en este contrato, posteriormente al vencimiento del convenio el equipo pasará a formar parte de la DA.

OCTAVA: COORDINACIÓN

La responsable del proyecto por parte del TEC será la Dra. Isabel Guzmán Arias profesora de la Escuela de Ingeniería Agrícola, cuyo teléfono es 2550-2462, correo electrónico iguzman@itcr.ac.cr. Todas las notificaciones administrativas, solicitudes de programa y entregas relacionadas con este convenio estarán dirigidas a esta persona.

Por parte del Minae, el responsable de fiscalizar el proyecto será Leonardo Cascante Chavarría, coordinador del departamento de Desarrollo hídrico, el cual se puede contactar al teléfono: 2106-2613 y al correo lcascante@da.go.cr

NOVENA: INFORMES

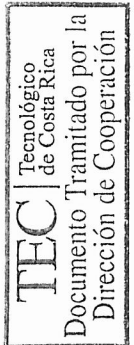
El TEC entregará informes de avance cada 6 meses y un informe al final de cada etapa (mencionada en la cláusula Segunda) hasta 30 días de vencido el plazo de entrega de cada etapa. Este documento debe incluir un informe completo y detallado de las actividades realizadas y una evaluación de los logros/éxitos obtenidos bajo el Acuerdo.

DÉCIMA: NOTIFICACIONES

Cualquier comunicación o notificación que deba ser efectuada en los términos de esta Carta o con ocasión de su ejecución, deberá ser enviada por correo certificado o por fax según la información que a continuación se describe:

TEC:

Atención: Isabel Guzmán Arias, Escuela de Ingeniería Agrícola
Dirección: 800 m sur de la Basílica de los Ángeles, Cartago
Apartado: 159-7050 Cartago, Costa Rica
Fax: (506) 2550- 2271



Vc.Bo

MINAE

Atención: José Miguel Zeledón Calderón

Dirección: Edificio ALVASA, entrada ruta 32, avenida 19 (Costado Este Periódico La República), Barrio Tournon, San José, Costa Rica.

Apartado: 13043-1000

Fax: (506) 2221-7516

DÉCIMO PRIMERA: MODIFICACIONES

Cualquier modificación a los términos de la presente Carta deberá ser acordada por las Partes mediante la celebración por escrito del respectivo Adendum. Caso contrario, de considerar los Coordinadores nombrados al efecto, que las modificaciones que se requieran realizar no afectan sustancialmente el objeto propio del presente documento, podrán realizarlas bajo su entera responsabilidad, mediante simple intercambio de notas, igualmente deberán informar al respecto a los jefes suscribientes y constar dicha gestión dentro del expediente respectivo que custodia cada entidad.

DÉCIMO SEGUNDA: PROPIEDAD INTELECTUAL

Los derechos de autor derivados de la información, el conocimiento generado, las metodologías y patentes que se generen a la luz de la presente Carta de Entendimiento, se compartirán con el MINAE para que el mismo haga uso de los mismos según sus propias necesidades. En el caso de los derechos de autor de las metodologías de caudal ambiental desarrolladas son propiedad conjunta del Instituto Tecnológico de Costa Rica, del MINAE (Dirección de Agua) y de los investigadores involucrados en el proyecto.

Queda entendido que en toda publicación que se haga al amparo de la presente Carta de Entendimiento, se dejará constancia de que los documentos o materiales que se publican o divulgan, han sido producidos dentro del marco del presente instrumento y deberán darse también los créditos correspondientes a los autores de las publicaciones que se hagan. Si a lo interno de las partes suscribientes de esta Carta, existieran procedimientos o manuales para el manejo de imagen de cada organización, en las publicaciones o divulgaciones que se hagan, deberá tenerse presente lo indicado en esos documentos o regulaciones.

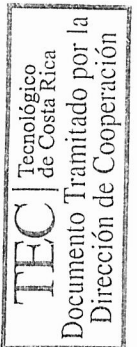
DÉCIMO TERCERA: CESIÓN

Cualquier derecho derivado de la presente carta de entendimiento, no podrá ser cedido por las partes, a menos que la parte cedente cuente con la autorización por escrito de la otra parte.

DÉCIMO CUARTA: AUSENCIA O SUBORDINACIÓN LABORAL

Teniendo en cuenta que el TEC ejecutará sus obligaciones bajo el presente Carta de Entendimiento con autonomía e independencia administrativa, financiera, técnica y directiva, asumiendo todos los riesgos y con sus propios medios y conforme sus propias directrices y conocimientos, queda expresamente acordado y entendido que:

La ejecución de los acuerdos que se generen a través de esta carta de entendimiento, no configura relación laboral entre el MINAE y el personal que utilice el TEC, respecto del cual el TEC es el único empleador. En consecuencia, serán de cargo y por cuenta exclusiva del TEC, el pago de salarios,



vacaciones, prestaciones sociales, indemnizaciones y en general, el cumplimiento de todas las obligaciones que se generen a favor de dicho personal o con ocasión de su utilización, incluyendo, pero sin limitarse a obligaciones laborales, pago de aportes al sistema de seguridad social integral y parafiscales si fuere aplicable. El TEC mantendrá libre e indemne al MINAE por cualquier reclamación, demanda o perjuicio relacionado con el incumplimiento de obligaciones derivadas de la utilización de personal en la ejecución de este Convenio.

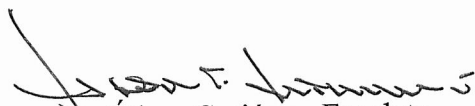
DÉCIMO QUINTA: EXCLUSIÓN DE REFRENDO Y DE APROBACIÓN INTERNA

La presente Carta de Entendimiento se encuentra excluida de refrendo por parte de la CONTRALORÍA y de aprobación interna por parte de las Asesorías Jurídicas de las Administraciones involucradas, lo anterior por tratarse de una actividad de cooperación desarrollada entre entes de derecho público a tenor de lo establecido en el artículo 2 inciso c) de la Ley N° 7494 de 2 de mayo de 1995 (Ley de Contratación Administrativa y sus reformas) y 130 de su Reglamento (Decreto Ejecutivo N° 33411-H de 2 de septiembre de 2009), así como por lo dispuesto en el artículo 3 inciso 6) del “Reglamento sobre el Refrendo de las Contrataciones de la Administración Pública” emitido por la Contraloría General de la República (Resolución N° R-CO-44-2007 de las 9:00 horas de 11 de octubre de 2007), en consecuencia no se encuentra sujeto a dicho requisito de eficacia.

DÉCIMO SEXTA: NORMAS SUPLETORIAS

En lo no previsto expresamente en la presente Carta de Entendimiento, regirá supletoriamente la normativa interna de cada institución, las leyes aplicables y los principios generales que rigen el ordenamiento jurídico administrativo.

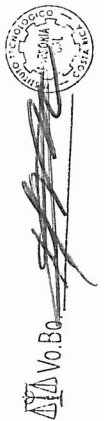
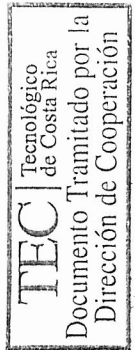
EN FE DE LO CUAL, los representantes debidamente autorizados por las partes suscriben esta Carta en la fecha indicada abajo:


Dr. Édgar Gutiérrez Espeleta
MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA




Dr. Julio César Calvo Alvarado
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Rectoría

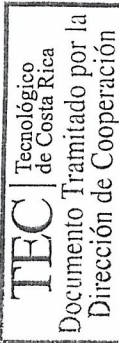


**CONVENIO ESPECÍFICO DE COOPERACIÓN ENTRE EL INSTITUTO
TECNOLOGICO DE COSTA RICA Y LA JUNTA ADMINISTRATIVA DEL SERVICIO
ELÉCTRICO MUNICIPAL DE CARTAGO**

Entre nosotros, la **JUNTA ADMINISTRATIVA DEL SERVICIO ELÉCTRICO MUNICIPAL DE CARTAGO** institución pública no estatal con sede en la ciudad de Cartago, con cédula de persona jurídica número 3-007-045087, representada en este acto por **JUAN ANTONIO SOLANO RAMIREZ**, mayor, casado, Licenciado en Derecho, cédula de identidad 1-689-115, vecino de Cartago actuando en su condición de Gerente General, con facultades legales amplias y suficientes para el acto objeto de este instrumento; en adelante y para efectos de este convenio se denominará "**JASEC**", y el "**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA** en adelante denominado "**TEC**", con sede en Cartago, Costa Rica, número de cédula jurídica cuatro mil-cero cuarenta y dos ciento cuarenta y cinco-cero siete, representado por **JULIO CÉSAR CALVO ALVARADO**, mayor, casado, Ingeniero Forestal, vecino de Heredia, con cédula de identidad número – uno- seiscientos treinta y nueve- quinientos cuarenta y uno, en su calidad de **RECTOR**, según Asamblea Plebiscitaria del día veintiuno de mayo de dos mil quince; publicado en La Gaceta Número ciento veintinueve del mismo año; suscriben el presente Convenio Específico de Cooperación, sujeto a las consideraciones y cláusulas siguientes:

CONSIDERANDO:

1. Que existe un Convenio Marco de Cooperación entre la "JASEC" y el "TEC", suscrito en fecha 12 de mayo del 2008.
2. Que conforme a la Cláusula Sexta del Convenio Marco de Cooperación suscrito entre el TEC y la JASEC, se establece la posibilidad de que para cada actividad, programa o proyecto que se genere bajo el marco del convenio, se podrá suscribir una Carta de Intenciones Específica amparada al Convenio Marco.
3. Que el TEC a través de la Escuela de Ingeniería Agrícola cuenta con un proyecto de investigación enfocado al estudio de metodologías para la determinación de caudal ambiental para las cuencas hidrográficas de Costa Rica.
4. El proyecto mencionado requiere la validación en cuencas representativas de cada unidad hidrológica con que cuenta el país, siendo la primera cuenca piloto seleccionada la del Río Birris.
5. Que el TEC, específicamente en la Escuela de Ingeniería Agrícola, cuenta con un grupo de profesionales expertos y con experiencia en el campo la investigación en temas del recurso hídrico.
6. Que la JASEC es el ente generador de los servicios eléctricos en Cartago y uno de los principales usuarios del recurso hídrico dentro de la cuenca del Río Birris.
7. Que el TEC y la JASEC, comparten objetivos e intereses comunes a favor de la identificación de parámetros y condiciones de las cuencas aprovechadas con el fin de tener un aprovechamiento de los recursos hídricos de una forma integral, asegurando la sostenibilidad del desarrollo económico, social y ambiental.



POR TANTO:

Convenimos en celebrar el presente Convenio Específico, que se registrá por las cláusulas siguientes:

PRIMERA: OBJETO DEL CONVENIO

El objeto del presente Convenio consiste en desarrollar una metodología general para determinar el caudal ambiental en el marco del manejo integral del recurso hídrico, el cual forma parte del proyecto de investigación aprobado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Tecnológico de Costa Rica "Propuesta metodológica para la determinación de caudal ambiental en una cuenca piloto en el marco del proceso de otorgamiento de concesiones de agua".

SEGUNDA: ALCANCE

El presente convenio se enmarca dentro de la ejecución de una etapa inicial para el desarrollo de la metodología de caudal ambiental para Costa Rica. Se evaluará la metodología propuesta en una cuenca piloto, para estos efectos será la cuenca del río Berrís. Se realizarán una serie de mediciones de parámetros específicos de la cuenca, clima e hidrométricos para validar la propuesta de cálculo del caudal ambiental.

TERCERA: COMPROMISOS DEL TEC:

El TEC a través de la Escuela de Ingeniería Agrícola ejecutará las actividades siguientes:

- a) Revisar en forma exhaustiva las metodologías actuales utilizadas a nivel internacional para la determinación de caudal ambiental y propuesta de una metodología de cálculo de acuerdo a las condiciones de las Unidades Hidrológicas de Costa Rica.
- b) Determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Berrís, usando: datos hidrometeorológicos, de uso de la tierra, tipos de suelo, topografía.
- c) Identificar los puntos de control para la medición de caudales en cauce del río Berrís y afluentes
- d) Adquirir e instalar los sensores en el cauce principal y afluentes
- e) Monitorear los niveles de agua en los puntos de control
- f) Evaluar la propuesta metodológica para caudal ambiental de acuerdo a los parámetros de la cuenca piloto del río Berrís
- g) Entregar un informe con los resultados del estudio a la JASEC después de dos años de ejecución del proyecto (Cláusula Quinta).
- h) Capacitar y asesorar a JASEC acerca del mantenimiento de los sistemas de medición a instalar y de la metodología de cálculo propuesta.

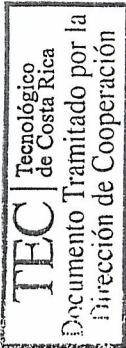


Vo.Bo.

CUARTA: COMPROMISOS DE LA JASEC:

La JASEC se compromete a:

- a) Aportar datos pluviométricos y de caudal registrados por equipos pertenecientes a la JASEC, para fines del proyecto en estudio.
- b) Una vez finalizada la ejecución del proyecto, el TEC entregará los equipos instalados en la cuenca en custodia de la JASEC para que ésta continúe la operación de los mismos.
- c) Deberá dar mantenimiento preventivo, cuidar y obtener la información en forma regular de los sensores en operación.
- d) Aportar el recurso humano y transporte necesario para el mantenimiento preventivo, cuidado y obtención de la información; una vez que los equipos entren en custodia de la JASEC y hasta la finalización del Convenio.
- e) Deberá compartir la información obtenida de los equipos instalados, cuando el TEC así lo solicite.
- f) En caso de daño o robo deberá informar al TEC inmediatamente.
- g) Una vez finalizado el tiempo de este convenio específico los equipos deberán ser devueltos al TEC.



QUINTA: PLAZO DE VIGENCIA

El plazo de vigencia de este Convenio será de 4 años a partir de la firma del mismo, Y podrá ser prorrogado, si así lo manifiestan y notifican por escrito las partes un mes antes al vencimiento del plazo de vigencia del presente convenio.

SEXTA: COSTOS COMPARTIDOS

Para el desarrollo e implementación del proyecto, el TEC, por medio de la Escuela de Ingeniería Agrícola, aportará el apoyo docente, estudiantes asistentes, practicantes de grado y/o posgrado y administrativo que demande el proyecto, el espacio físico, las redes informáticas, y equipos terrestres de medición de parámetros hidrometeorológicos y/o marítimos; todo de acuerdo a las posibilidades y la normativa institucional.

La JASEC aportará el recurso humano, transporte y medios informáticos para mantener, cuidar y obtener la información de los equipos instalados en la cuenca del Birrís, una vez que queden en custodia de ésta.



SÉPTIMA: COORDINACIÓN

La responsable del proyecto por parte del TEC será la Ing. Karolina Villagra Mendoza profesora de la Escuela de Ingeniería Agrícola, cuyo teléfono es 2550-2876, correo electrónico kvillagra@itcr.ac.cr. Todas las notificaciones administrativas, solicitudes de programa y entregas relacionadas con este convenio estarán dirigidas a esta persona. El responsable y fiscalizador del proyecto por parte de la JASEC será Ricardo Chavez, Coordinador sistema Hidroeléctrico Birrís, teléfono 25347447, Ricardo.chavez@jasec.go.cr.

OCTAVA: INFORMES

El TEC entregará un informe al final de la ejecución del proyecto hasta 30 días de vencido el plazo. Este documento debe incluir un informe completo y detallado de las actividades realizadas, resultados y una evaluación de los logros/éxitos obtenidos bajo el Acuerdo.

NOVENA: RESOLUCIÓN DE CONTROVERSIAS

Las Partes se comprometen a hacer su mejor esfuerzo para arreglar de buena fe y de forma amigable las controversias que surjan durante la ejecución de este Convenio por lo que de presentarse algún problema o divergencia, éste deberá ser resuelto inicialmente por los administradores designados y de no haber acuerdo a ese nivel, el diferendo se someterá ante las autoridades suscribientes.

DÉCIMA: NOTIFICACIONES

Cualquier comunicación o notificación que deba ser efectuada en los términos de este Convenio o con ocasión de su ejecución, deberá ser enviada por correo certificado o por fax según la información que a continuación se describe:

TEC:

Atención: Karolina Villagra Mendoza, Escuela de Ingeniería Agrícola

Dirección: 800 m sur de la Basílica de los Ángeles, Cartago

Apartado: 159-7050 Cartago, Costa Rica

Fax: (506) 2550-2271

JASEC

Atención: Ricardo Chavez

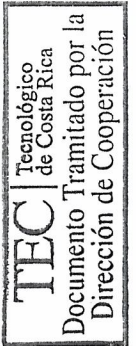
Dirección: Planta hidroeléctrica Birrís 3

Telefax: 25347447

Email: Ricardo.chavez@jasec.go.cr

DÉCIMO PRIMERA: MODIFICACIONES

Cualquier modificación a los términos del presente Convenio deberá ser acordado por las Partes mediante la celebración por escrito del respectivo Addendum. Caso contrario, de considerar los administradores del Convenio nombrados al efecto, que las modificaciones que se requieran realizar no afectan sustancialmente el objeto propio del presente documento, podrán realizarlas bajo su entera responsabilidad, mediante simple intercambio de notas, igualmente deberán informar al respecto a los jerarcas suscribientes y constar dicha gestión dentro del expediente respectivo que custodia cada entidad.



DÉCIMO SEGUNDA: CONFIDENCIALIDAD

Las partes acuerdan que cualquier información intercambiada entre ellas en el transcurso de la investigación objeto del presente acuerdo, será mantenida en estricta confidencialidad, salvo previa aprobación por escrito. Se considera también información confidencial: a) La que no sea de fácil acceso y b) Aquella información que esté sujeta a medidas de protección razonables, de acuerdo con las circunstancias del caso, a fin de mantener su carácter confidencial.

No habrá deber alguno de confidencialidad en los siguientes casos: a) cuando la parte receptora tenga evidencia de que conoce previamente la información recibida, b) cuando la información recibida sea de dominio público, c) cuando la información deje de ser confidencial por ser revelada por el propietario y d) cuando la información recibida proceda de un tercero que no exige secreto.

Queda entendido que en toda publicación que se haga al amparo del presente Convenio, se dejará constancia de que los documentos o materiales que se publican o divulgan, han sido producidos dentro del marco del presente instrumento y deberán darse también los créditos correspondientes a los autores de las publicaciones que se hagan. Si a lo interno de las partes contratantes existieran procedimientos o manuales para el manejo de imagen de cada organización, en las publicaciones o divulgaciones que se hagan, deberá tenerse presente lo indicado en esos documentos o regulaciones.

DÉCIMO TERCERA: CESIÓN

Este Acuerdo o cualquier derecho derivado del mismo, no podrá ser cedido por las partes, a menos que la parte cedente cuente con la autorización por escrito de la otra parte.

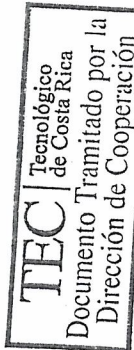
DÉCIMO CUARTA: AUSENCIA O SUBORDINACIÓN LABORAL

Teniendo en cuenta que el TEC ejecutará sus obligaciones bajo el presente Convenio con autonomía e independencia administrativa, financiera, técnica y directiva, asumiendo todos los riesgos y con sus propios medios y conforme sus propias directrices y conocimientos, queda expresamente acordado y entendido que:

La ejecución del presente acuerdo no configura relación laboral entre la JASEC y el personal que utilice el TEC, respecto del cual el TEC es el único empleador. En consecuencia, serán de cargo y por cuenta exclusiva del TEC, el pago de salarios, vacaciones, prestaciones sociales, indemnizaciones y en general, el cumplimiento de todas las obligaciones que se generen a favor de dicho personal o con ocasión de su utilización, incluyendo pero sin limitarse a obligaciones laborales, pago de aportes al sistema de seguridad social integral y parafiscales si fuere aplicable. El TEC mantendrá libre e indemne a la JASEC por cualquier reclamación, demanda o perjuicio relacionado con el incumplimiento de obligaciones derivadas de la utilización de personal en la ejecución de este Convenio.

DÉCIMO QUINTA: EXCLUSIÓN DE REFRENDO Y DE APROBACIÓN INTERNA

El presente CONVENIO se encuentra excluido de refrendo por parte de la CONTRALORÍA y de aprobación interna por parte de las Asesorías Jurídicas de las Administraciones involucradas, lo anterior por tratarse de una actividad de cooperación desarrollada entre entes de derecho público a tenor de lo establecido en el artículo 2 inciso c) de la Ley N° 7494 de 2 de mayo de 1995 (Ley de Contratación Administrativa y sus reformas) y 130 de su Reglamento (Decreto Ejecutivo N° 33411-



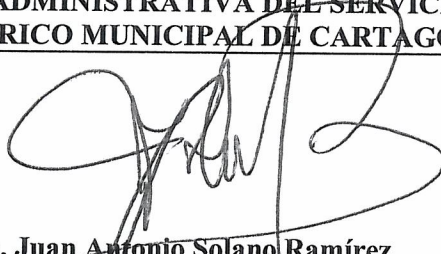

H de 2 de septiembre de 2009), así como por lo dispuesto en el artículo 3 inciso 6) del "Reglamento sobre el Refrendo de las Contrataciones de la Administración Pública" emitido por la Contraloría General de la República (Resolución N° R-CO-44-2007 de las 9:00 horas de 11 de octubre de 2007), en consecuencia no se encuentra sujeto a dicho requisito de eficacia, los numerales 5 y 23 de la Ley 7799 Reforma a la Ley de JASEC, los numerales 5 y 111 del Decreto Ejecutivo 35148-MINAET Reglamento al Título II de la Ley de Fortalecimiento y Modernización de las entidades Públicas del Sector Telecomunicaciones y el numeral 45 de la Ley de Fortalecimiento y Modernización de las entidades Públicas del Sector Telecomunicaciones.

DÉCIMO SEXTA: NORMAS SUPLETORIAS

En lo no previsto expresamente en el presente Convenio, regirá supletoriamente la normativa interna de cada institución, las leyes aplicables y los principios generales que rigen el ordenamiento jurídico administrativo.

EN FE DE LO CUAL, los representantes debidamente autorizados de las partes ejecutan este Convenio en la fecha indicada abajo:

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Documento Tramitado por la
Dirección de Cooperación

JUNTA ADMINISTRATIVA DEL SERVICIO ELÉCTRICO MUNICIPAL DE CARTAGO	INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
 Lic. Juan Antonio Solano Ramírez Gerente General	 Dr. Julio César Calvo Alvarado Rector 19/09/2016

TEC | Tecnológico de Costa Rica
V. B. Bo.

Plan de trabajo para la construcción de la metodología de cálculo

OE	Producto	Actividad	Tarea	Responsable detallado	Responsable	Avance (%)	Fecha de finalización por tarea	Fecha de finalización por actividad	Fecha de finalización por OE	
Determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca	Caudales teóricos	Caracterizar fisiografía de la cuenca	En SIG crear las capas de cuenca, ríos, uso de la tierra	Andrey/Karolina	TEC	50	3/9/2016	sep-16	dic-17	
			Obtener: pendiente promedio de la cuenca, pendiente promedio del cauce, densidad de drenaje, orden de la cuenca, forma de la cuenca	Andrey/Karolina	TEC	50	24/9/2016			
		Recolección de datos meteorológicos	Identificar estaciones meteorológicas dentro de la cuenca y alrededores	Karolina	TEC	100	19/8/2016	42614		
			Instalar pluviómetros en la cuenca	Pablo/Andrey	TEC	50	2/9/2016			
			Obtener datos meteorológicos de ICE, IMN (lluvias, Temperaturas diarias de los últimos 30 años)	DA	Dirección Agua	0	30/9/2016			
		Recolección datos hidrométricos	Gira de campo para identificar ubicación de los puntos de control para medición de caudales	Karolina/Fernando	TEC	100	Julio	dic-17		
			Instalar sensores en puntos de control	Pablo/Andrey/Fernando	TEC	0	30/9/2016			
			Lectura de los caudales en los puntos de control	Pablo	TEC	0	Cada 3 semanas			
		Recolección de información de uso de la tierra, tipo de suelo, cobertura, etc.	Gira de campo usos de la tierra	Pablo/Andrey/Karolina	TEC	100	30/8/2016	dic-16		
			Muestreo de suelos	Pablo/Karolina	TEC	0	16/12/2016			
			Obtención de coberturas y usos de la tierra (google-earth, carta, etc.)	Andrey/Karolina	TEC	100	31/8/2016			
		Análisis estadístico de los datos	Extensión-completación de los datos meteorológicos	Isabel	TEC	0	31/10/2016	oct-16		
			Consistencia de los datos meteorológicos	Isabel	TEC	0	31/10/2016			
			Determinación de precipitación de diseño para períodos de retorno de 5, 10, 15, 25, 50 años	Isabel	TEC	0	31/10/2016			
		Modelación hidrológica	Uso de HEC-HMS para obtener caudales máximos para los períodos de retorno indicados	Isabel	TEC	0	30/11/2016	nov-16		
		Evaluar diferentes metodologías para la determinación de caudal ambiental	Propuesta de metodología teórica para Q amb	Revisión bibliográfica	Revisión de documentación existente (web, organismos públicos y privados, documentos técnicos)	Andrey/Pablo/Jesus/Karolina	TEC-Dirección de Agua	100		5/9/2016
Selección de información atinente al tema	Pablo/Karolina				TEC-Dirección de Agua	100	19/9/2016			
Clasificación de la información	Pablo/DA-Jesus/Karolina				TEC-Dirección de Agua	100	26/9/2016			
Sesión de trabajo I: Decidir ruta de la metodología de cálculo	Todos				TEC-Dirección de Agua	100	30/09/2016 (9-12 md)			
Definición de ruta de clasificación de la metodología	Identificación de usos del RH en general (concesiones, etc)			Fernando	TEC-Dirección de Agua					
	Ruta de clasificación de las metodologías			Karolina	TEC-Dirección de Agua		14/10/2016			
	Identificación de las variables que definen comportamiento hidrológico de la cuenca (general)			Karolina	TEC-Dirección de Agua		14/10/2016			
	Confeccionar y enviar invitaciones			Karolina	TEC		14/10/2016			
	Sesión de trabajo II: Identificación de parámetros hidrológicos y usos del agua			Todos	TEC-Dirección de Agua		04/11/2016 (9-12 md)	dic-16		
Sesión de trabajo III: Taller de validación de cálculo con instituciones que relación con Ambiental	Instituciones			TEC-Dirección de Agua		23/11/2016 (8-12 md)				
Afinar el modelo con insumos del taller	Karolina			TEC-Dirección de Agua		4/12/2016				
Construcción de matriz de valoración de variables hidrológicas y usos del RH	Karolina			TEC-Dirección de Agua		4/12/2016				
Sesión de trabajo IV: Matriz de valoración afinada	Todos, ministro			TEC-Dirección de Agua		9/12/2016	ene-17			

		Formulación de la propuesta de cálculo	Sesión de trabajo V: Presentación propuesta metodología metodología a los actores de la Sesión III	Instituciones	TEC-Dirección de Agua		31/01/2017 (9 am-12 md)		
			Entrega de Informe de propuesta metodológica (Sin validar)	Isabel	TEC-Dirección de Agua		28/2/2017	feb-17	
			Publicación de la metodología		TEC-Dirección de Agua		31/3/2017	mar-17	
			App para cálculo	Pablo	TEC		16/12/2017	dic-17	
Evaluar metodología propuesta para una cuenca piloto	Metodología validada	Recolectar datos de campo de los aprovechamientos reales de la cuenca	Giras de campo (cada 3 meses): Inspección de los aprovechamientos del RH en la cuenca	Pablo	TEC		Cada 3 meses	dic-17	dic-17
		Determinar oferta y demanda mensual del RH en la cuenca	Cuantificar el caudal teórico, el real de la cuenca	Karolina	TEC		30/6/2017		
			Cuantificar la demanda de RH en la cuenca de acuerdo a los usos	Isabel	TEC-Dirección de Agua		31/7/2017		
			Hacer un balance de oferta y demanda del RH	Isabel	TEC		30/8/2016		
		Calcular caudal no contabilizado que es aprovechado sin concesión o con concesión	Aplicar encuestas a usuarios de la cuenca	Isabel/Andrey	TEC		30/9/2017		
Aplicar metodología propuesta	Comparar balances hídricos y caudales reales con el cálculo teórico del caudal ambiental	Isabel	TEC-Dirección de Agua		31/10/2017				
Convenio TEC-Jasec		Elaboración y firma del Convenio		Karolina/Jasec	TEC-Jasec	95	16/12/2016	dic-16	
Convenio TEC-Dirección Agua		Elaboración y firma del Convenio		Karolina/DA	TEC-Dirección de Agua		16/12/2016	dic-16	

Programa del taller:

“Caudal Ambiental: estrategia y conformación de equipo de trabajo”

Objetivo:

Definir la estrategia de trabajo para la formulación de una metodología de cálculo de caudal ambiental y especificar las capacidades del país para su puesta en marcha.

Cronograma y contenidos:

<i>Cronograma</i>	<i>Actividad</i>
8:00 – 8:30 am	Registro de participantes
8:30 – 9:00 am	Bienvenida y motivación
9:00 – 9:30 am	Recapitulación de avances
9:30 – 10:00 am	Recopilación de avances y perspectivas de cada institución. Presentación de tres casos (1)
10:00 – 10:15 am	Refrigerio
10:15 – 11:00 am	Continuación de presentación de casos (2 y 3)
11:00 – 11:15 am	Presentación de mapa conceptual sobre avances y perspectivas de las instituciones.
11:15 – 12:00 pm	Validación del mapa conceptual: espacio de consultas.
12:00 – 1:00 pm	Almuerzo
1:00 – 1:30 pm	Puntos de encuentro y puntos de desencuentro
1:30 – 2:00 pm	Capacidades reales del país: espacio de análisis y discusión
2:00 – 2:25 pm	Conformación de Equipo de Trabajo Multidisciplinario.
2:25 – 2:50 pm	Presentación de tareas y plazos para el equipo de trabajo.
2:50 – 3:00 pm	Cierre del taller.

Organiza:

Viceministerio de Agua, Mares, Costas y Humedales, Ministerio de Ambiente y Energía
 Escuela de Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico de Costa Rica
 Dirección de Agua, Ministerio de Ambiente y Energía

Colabora:

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)

“Llegar juntos es el principio. Mantenerse juntos, es el progreso. Trabajar juntos es el éxito”
 Henry Ford.



Taller: “Caudal Ambiental: estrategia y conformación de equipo de trabajo”

*“Llegar juntos es el principio.
Mantenerse juntos, es el progreso.
Trabajar juntos es el éxito”
Henry Ford.*

Contenido

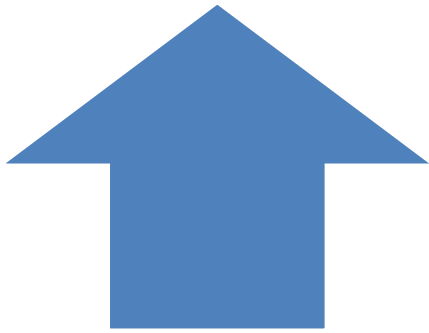
1. Concepto Caudal Ambiental
2. Importancia
3. Metodologías para cálculo de caudal ambiental
4. Antecedentes
 - Internacional
 - Nacional
5. Propuesta
 - Estrategia país

Concepto

Caudal ambiental o de compensación:

“El caudal ambiental fue definido como la cantidad, periodicidad y calidad del caudal de agua que se requiere para sostener los ecosistemas dulceacuícolas, estuarinos y el bienestar humano que depende de estos ecosistemas”. (Declaración de Brisbane, 2007)

Importancia



Uso excesivo del recurso
hídrico y el deterioro de
ecosistemas acuáticos



Limitan la disponibilidad
y calidad del agua

Importancia

Ciclo Hidrológico

- Atmósfera
- Biosfera
- Continente
- Océanos

División política vrs Cuenca hidrográfica

- Cantones, distritos.
- Área de recarga y recolección de agua.
- Cursos de agua.
- Cuerpos de agua.
- Ecosistemas
- Actividades humanas.

GIRH

- Aspectos: sociales, económicos, políticos, ecológicos e hidrológicos.
- Herramienta:
caudales ambientales
- La aplicación de caudales ambientales requiere:
involucramiento social, marco institucional y normativo, políticas claras y efectivas.

Metodologías

- Existen muchas metodologías, todas tienen ventajas y limitaciones
- Tharme (2003) recopiló más de 200 metodologías utilizadas en 50 países
- Procedimiento más adecuado

Método	Preferencia de uso (%)
Hidrológico	29.5
Hidráulico	11.1
Simulación de hábitat físico	28.0
Combinados	23.7
Holísticos	7.7

Proceso de análisis

¿Cómo es el sistema fluvial?

- Características del río (Hidrología, Morfología, Físico-química, Ecología, Aprovechamientos)
- Información existente (meteorológica, hidrométrica, biológica)
- Nivel de alteración hidrológica
- Balance Hídrico

Método más adecuado

- Identificación de métodos
- Identificación de especies y aprovechamientos
- Escala del aprovechamiento
- Selección del método a utilizar (criterios de selección)
- Esquema del procedimiento para determinar caudal ambiental

Validación del régimen de caudal ambiental

- Determinación del régimen de caudal ambiental
- Validación hidrológica

¿Cómo es el sistema fluvial?

Caracterización	Descripción de variables
Hidrológica (régimen sin alteraciones aguas arriba)	Tipo de régimen del río (efímero, intermitente, etc)
	Probabilidades de excedencia de los caudales (periodicidad)
	Magnitud e intensidad de las crecidas
	Periodicidad en que ocurren fenómenos climatológicos (El Niño-La Niña)
	Mínimo 20 años de datos diarios
	Salidas: aprovechamientos
	Hidrogramas
Morfología fluvial y dinámica estacional	<i>a) Análisis morfológico a nivel macroescala</i>
	Puede ser clasificación morfológica o eco-hidrológico
	Perfil longitudinal del cauce principal: identificar los cambios de pendiente
	<i>b) Análisis morfológico a nivel de mesoescala</i>
	Caracterizar especies relevantes
	Identificar actividades antrópicas relevantes
	Tipos de habitat presentes en el tramo, patrón de secuencia
<i>c) Análisis del transporte de sedimentos</i>	
Fisicoquímica	Oxígeno disuelto, pH, CE, T°, turbidez
Ecológica	Comunidades y poblaciones de la biota en el ecosistema fluvial: conocer taxonomía, riqueza y abundancia
	Epocas y sitios de reproducción, estructura de tallas de juveniles y adultos, biomasa, etc
	Especies nativas
Zonas ribereñas	Importancia y estado
Antrópica	Usos del agua

Métodos para la selección

Método	Descripción
Hidrológico	Se basa en relaciones matemáticas y estadísticas que hacen uso de la información hidrológica diaria o mensual en un período considerable de registros y a partir de estos se obtiene un caudal mínimo.
Hidráulico	Se basa en variables del flujo, tales como la profundidad, velocidad, sustrato, perímetro mojado, etc. Toma en cuenta secciones transversales críticas de un tramo fluvial, con la finalidad de evaluar de forma aproximada el hábitat acuático generado dentro del rango de caudales normales.
Simulación de hábitat físico	Cuantifica la cantidad y calidad de hábitat acuáticos, bajo múltiples regímenes hidrológicos y diferentes escenarios de estructura biológica confiable.
Combinados	Diferentes combinaciones de métodos.
Holísticos	Se basa en el concepto de flujos naturales y principios básicos que guían a la continuidad del río, para mantener o restaurar los componentes biofísicos relacionados con el flujo de agua, la ecología de los procesos de los sistemas fluviales como también de las de aguas subterráneas, las llanuras de inundación y las aguas receptoras.

Validación del régimen de Caudal Ambiental

Aplicación de las metodologías seleccionadas en un río específico como caso de estudio para la identificación de desafíos y oportunidades de mejora.

Antecedentes

Internacional

Reestructuración marco legal e institucional.

Estudios piloto sobre cuencas específicas.

Aplicación exitosa de diferentes metodologías combinadas.

Ejemplos: Chile, México, Colombia, Uruguay

Antecedentes

Nacional

Característica de concesiones en Costa Rica: variabilidad de escalas de uso del agua.

Experiencias recopiladas: Aplicación de metodología holística por parte del ICE y algunos estudios para investigación.

*Avances más recientes, conversatorio: ***“Caudal Ambiental: definición, administración y normativa en Costa Rica”***, realizado el 27 de Octubre del 2015 por UNESCO.

Papel de la Dirección de Agua:

Administración de Recurso Hídrico

Garantizar la reserva de caudal ambiental para salud de los ecosistemas.

*Avances como país...

Acuerdos tomados en Conversatorio: *“Caudal Ambiental: definición, administración y normativa en Costa Rica”*, realizado el 27 de Octubre del 2015 por UNESCO:

...

- *Metodología debe ajustarse a la cuenca y no la cuenca a la metodología.*
- *Metodología debe ajustarse en un todo a las reglas unívocas de la ciencia y la técnica (principio constitucional de objetivación de la tutela ambiental)*
- *Debe definirse Lineamientos y criterios mínimos para la implementación de metodologías.*
- *Toda metodología debe incluir criterios: hidrológicos, hidráulicos, ecológicos, económicos y socioculturales...*

Estrategia a nivel de país:

1. Conformación del equipo de trabajo (Objetivo del primer taller)
2. Integración de la información: Conceptual, Normativa y Metodológica
3. Adaptación conceptual con base en criterios de selección del estimador.
4. Proceso de conceptualización y perspectivas de aplicación (opiniones)
5. Aplicación de Metodologías: Hidrológica, Eco-hidráulica y Holística
 - 5.1 Estudio de caso
6. Identificación de desafíos y oportunidades para la implementación.

1. Conformación del equipo de trabajo

Necesidades de conocimiento	Instituciones
Ingeniería agrícola Hidrología Derecho ambiental Biología Sociología Informática Geología Forestal Geografía	Tecnológico de Costa Rica Universidad de Costa Rica Universidad Nacional Dirección de Agua Instituto Costarricense de Electricidad Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento. Sistema Nacional de Áreas de Conservación.

2. Revisión bibliográfica: Conceptual, Normativa y Metodológica

Teoría	Modo de abordaje
Conceptual	Revisión bibliográfica de los conceptos base para fundamentar la propuesta de cálculo de caudal ambiental.
Normativa	Revisión del marco normativo e institucional que rige al país en el tema de recurso hídrico y temas afines.
Metodológica	Investigación exhaustiva de diferentes metodologías para cálculo de caudal ambiental existente y selección de las opciones que mejor se adaptan a las condiciones de Costa Rica.

3. Adaptación conceptual con base en criterios de selección del estimador

Basados en el concepto de escalas de uso del agua y el análisis integral de disponibilidad de agua en la corriente, se seleccionan al menos tres metodologías diferentes que se adapten a los [criterios de selección](#) definidos para cada escala. Estos criterios tienen que ver en gran medida con la disponibilidad de datos de entrada para el cálculo y los impactos que la solicitud provoquen en el sistema hídrico.

Criterios de selección para cada metodología

Ejemplo de algunos criterios preliminares:

Metodología	Criterios para la selección
Hidrológica	Se brindaría un valor único de caudal ambiental para todo el año. Solicitudes de caudal menores a xx Disponibilidad de registro de caudales o precipitación.
Eco - Hidráulica	Se brindaría un valor único de caudal ambiental para todo el año. Solicitudes de caudal entre xx y xx Disponibilidad de registro de caudales o precipitación. Información topográfica del curso de agua. Identificación de especies indicadoras.
Holística	Se brindaría el espectro completo del régimen hidrológico. Solicitudes de caudal mayores a xx Disponibilidad de registro de caudales o precipitación. Información topográfica del curso de agua. Población en riesgo y posibles impactos sociales. Identificación de especies indicadoras. Se muestran los resultados por escenarios de riesgo.

4. Proceso de conceptualización y perspectivas de aplicación (opiniones)

Esto sería el componente de validación de la propuesta mediante un análisis FODA con intervención de representantes de los entes involucrados en el tema.

5. Aplicación de Metodologías: Hidrológica, Eco-hidráulica y Holística

En atención a la clasificación de metodologías según la escala de uso, se estaría utilizando una cuenca piloto para aplicación de las tres metodologías como validación técnica en el campo.

6. Identificación de desafíos y oportunidades para la implementación

Los resultados de la validación darían la posibilidad de hacer los ajustes técnicos requeridos.

Ruta de avance

- Identificar primero puntos de control por UH que permitan tener un mapeo a nivel macro de todo el país.
- Orden de prioridad por Unidades Hidrológicas:
 - 1) Tempisque-Pacífico Norte
 - 2) Tárcoles-Pacífico Central
 - 3) Térraba-Pacífico Sur
 - 4) San Juan
 - 5) Caribe

Productos esperados

- Matriz de criterios como herramienta para que la DA decida qué metodología debe emplear para el cálculo de caudal ambiental según la escala de uso y las características de cada solicitud de concesión.
- Manual detallado con los pasos a seguir para cada metodología seleccionada.
- Hoja de ruta e instrumentos de compromisos (decreto)
- Capacidades del país para soportar la metodología propuesta.

Cálculo de caudal ambiental

Avances y perspectivas de las instituciones

Insumos

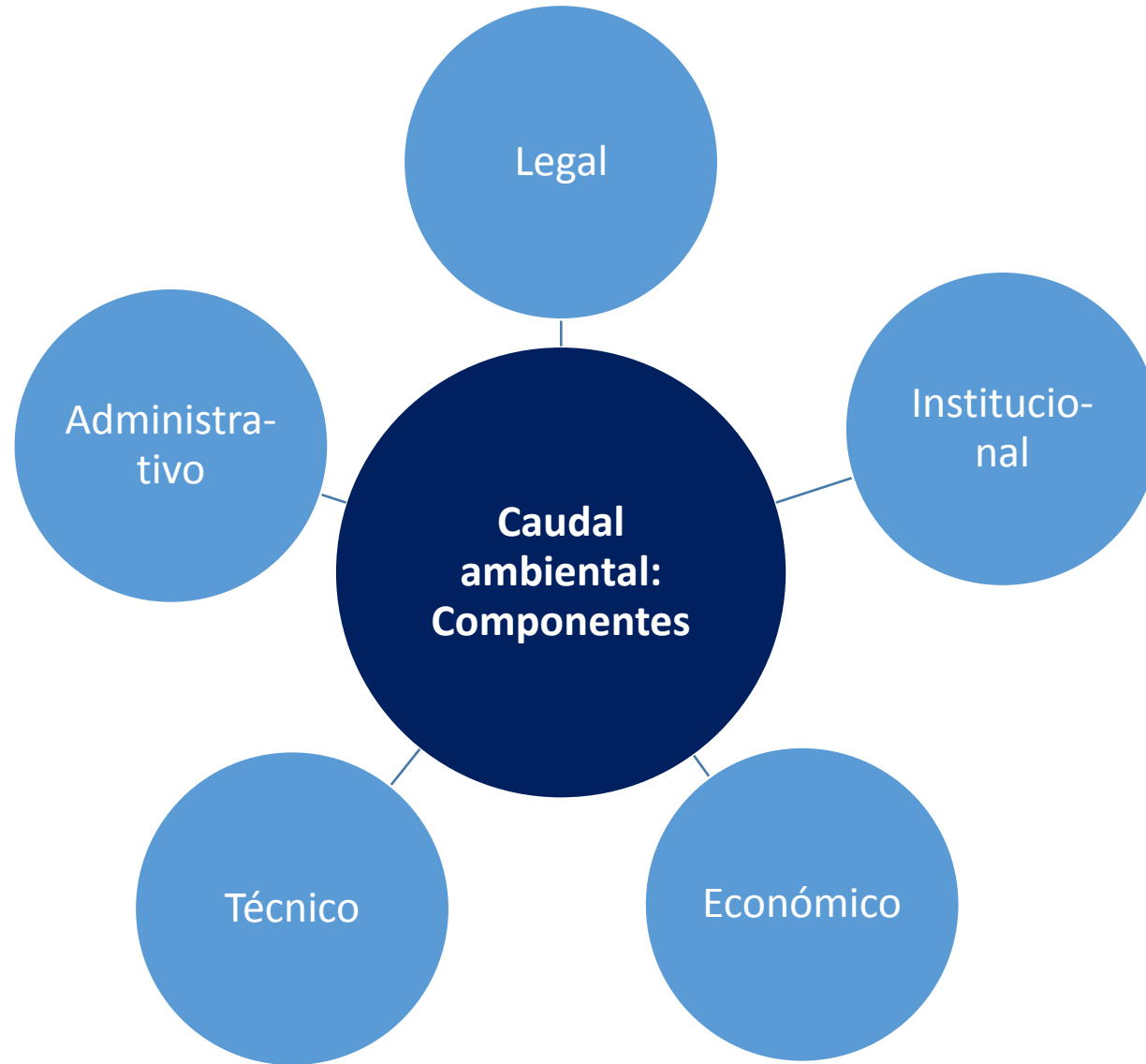
Información de entrada para aplicación de la (s) metodologías

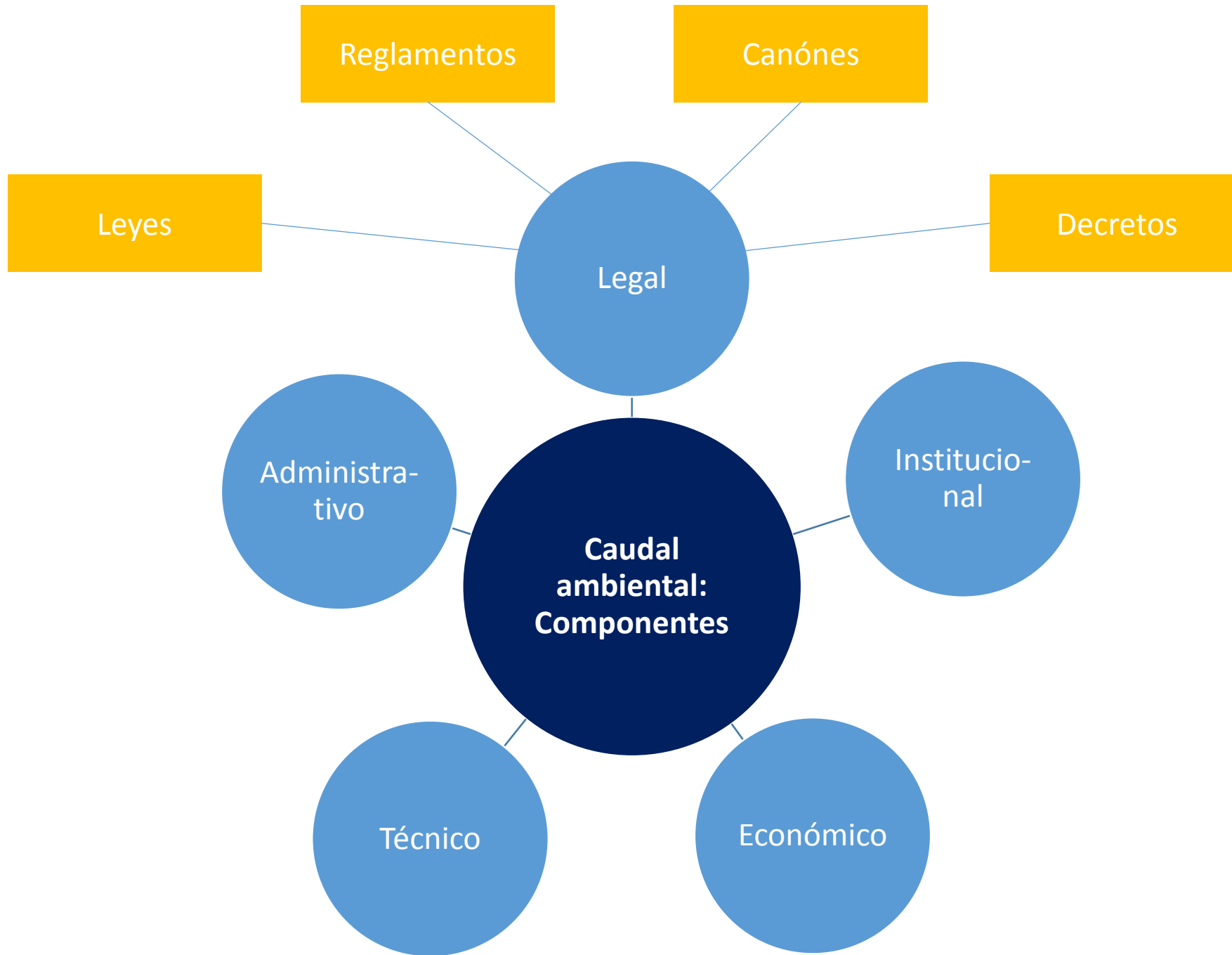
Proceso

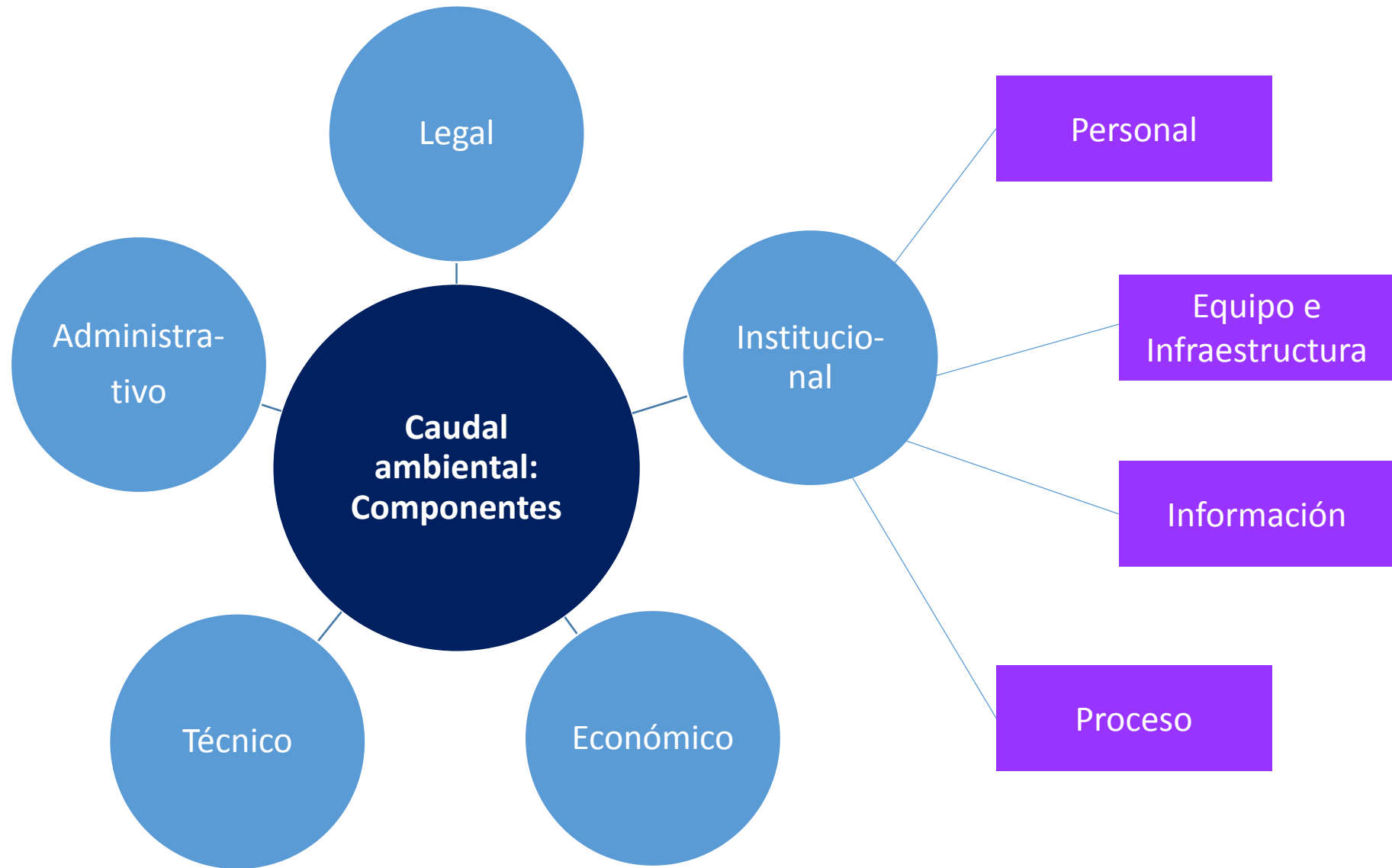
Aplicación de metodología

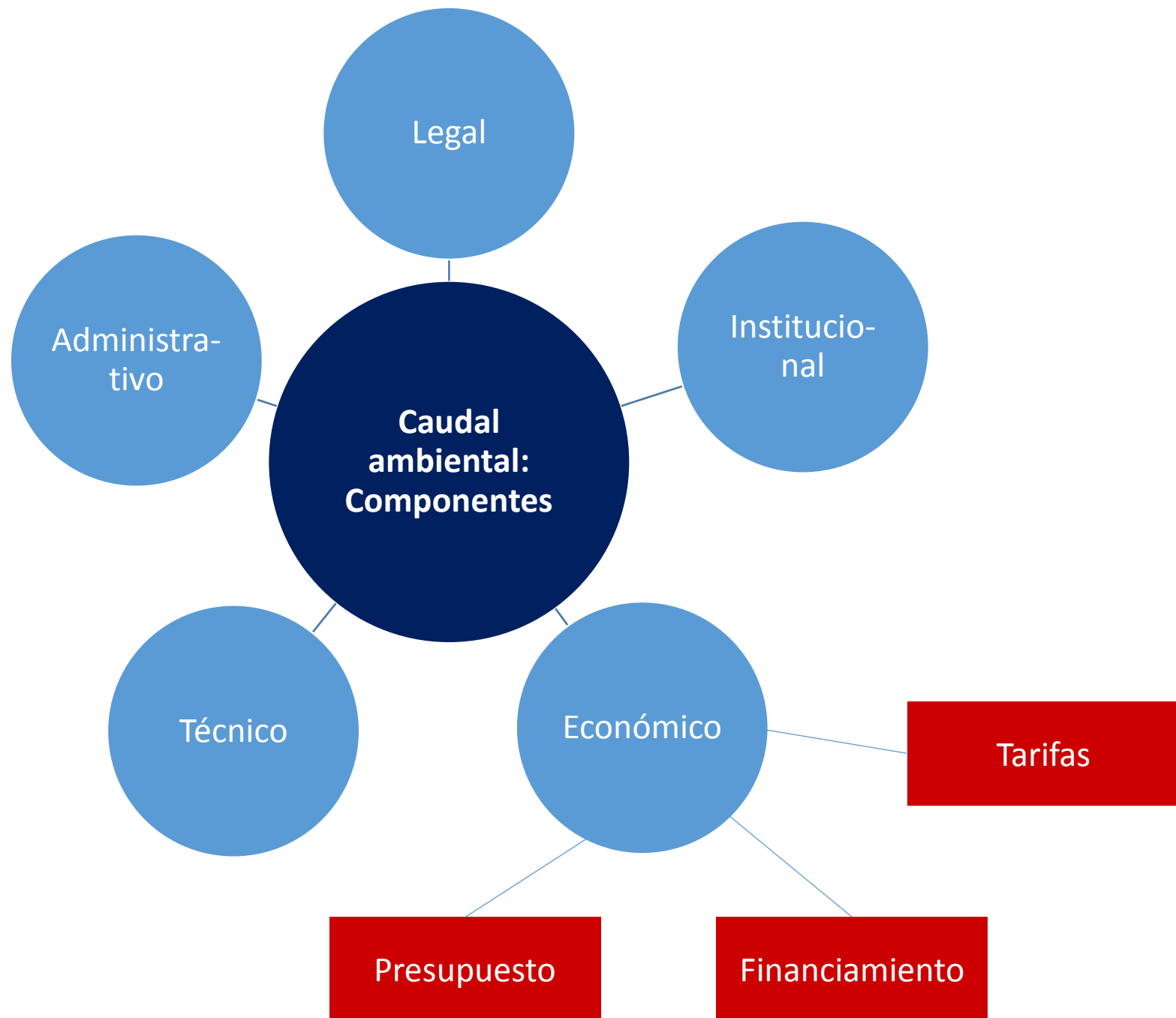
Productos

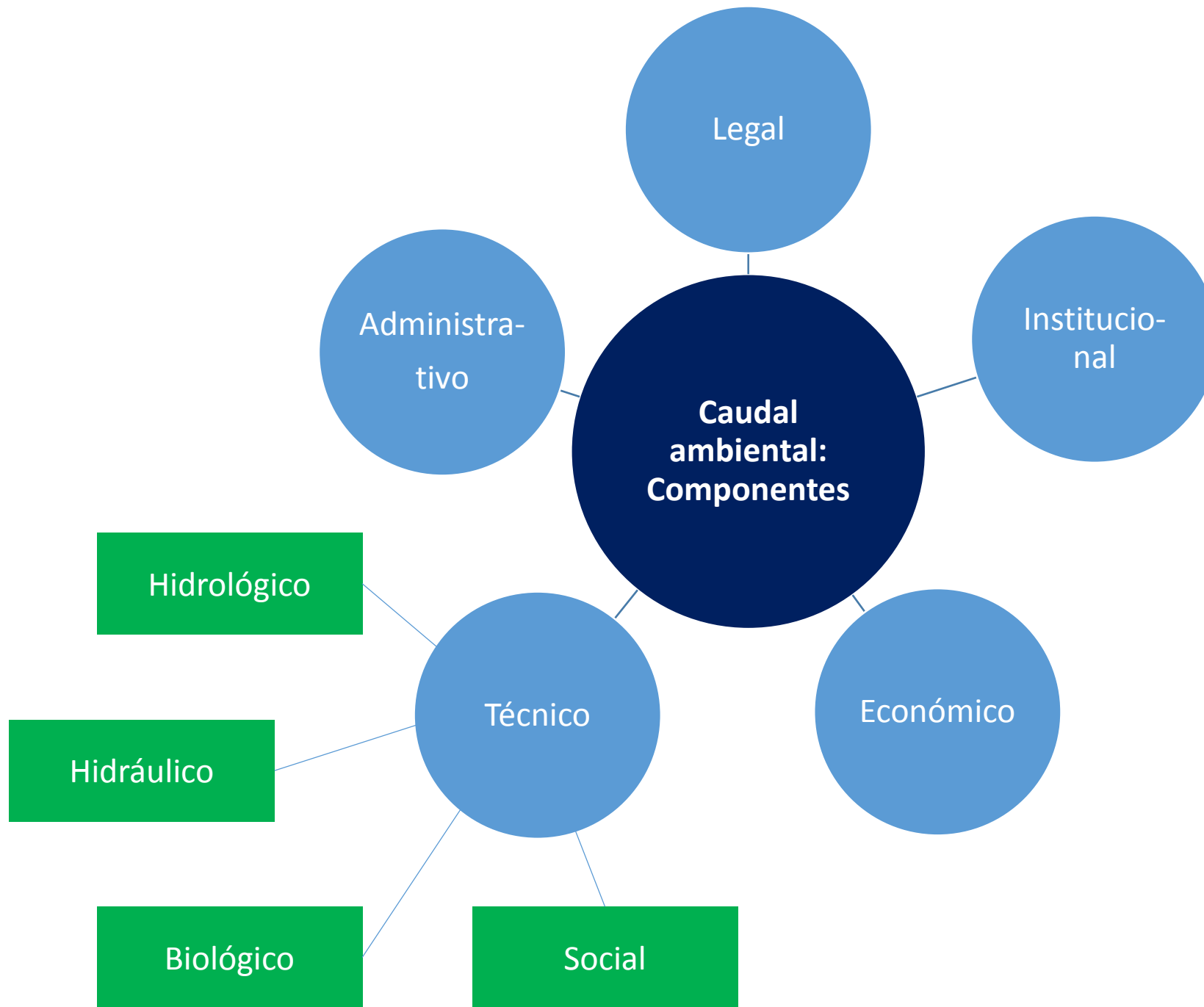
Inventario de reserva de caudal para sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos

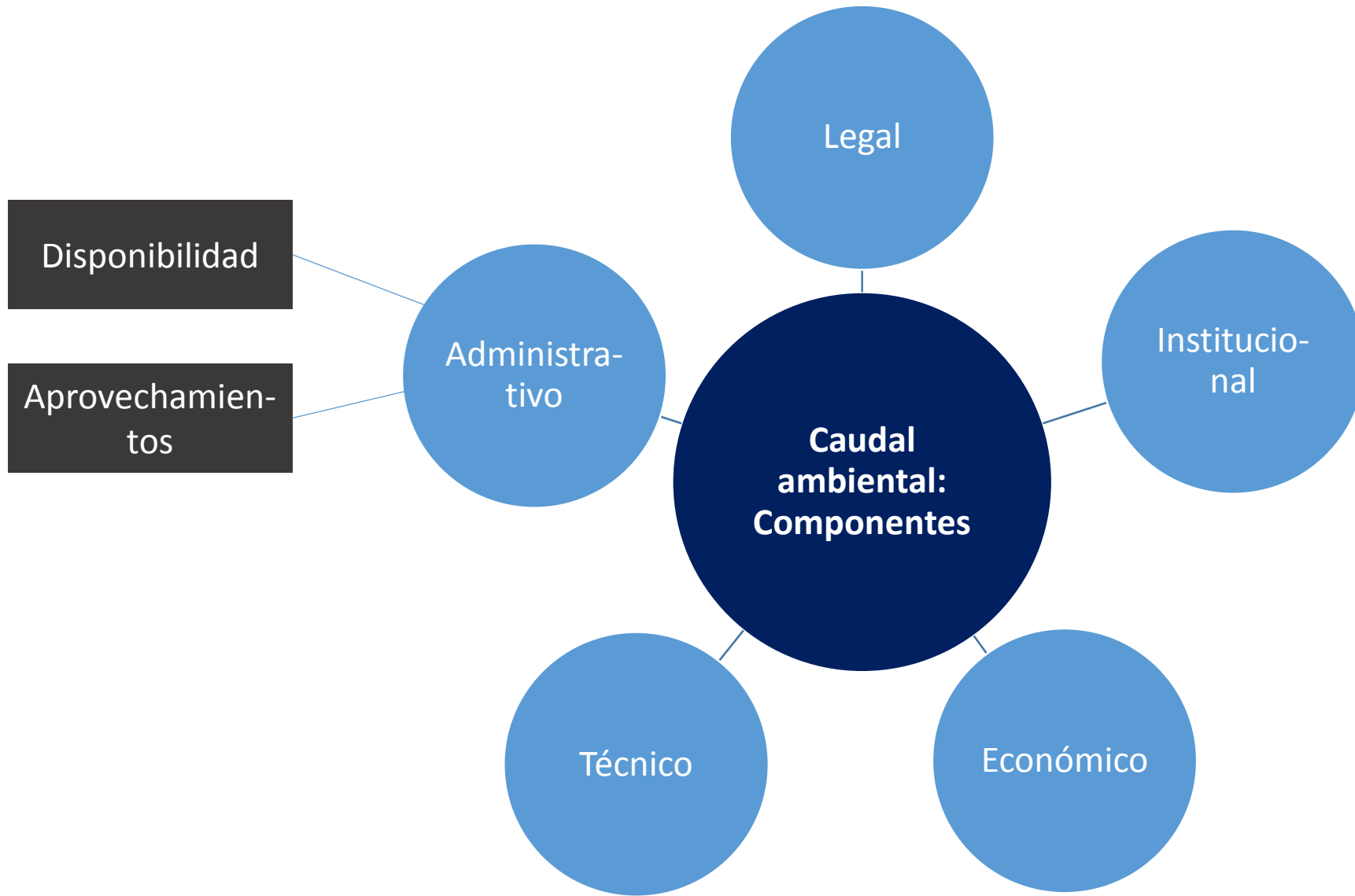












Aportes y perspectivas

ACOPE

ICE

CNFL

ESPH

Estudios y experiencias con Reventazón: planeación / operación. Herramientas para la medición y determinación de los caudales.

El cálculo de caudal ambiental es una labor incorporada dentro de los procesos propios de los estudios de proyectos, en el diseño y operación de las plantas.

Medición de variables hidrometeorológicas

Contribuir con la experiencia generada

Aportes y perspectivas

CONARE

UNESCO

MAG

CFIA

SINAC

Trabajo en conjunto con otras organizaciones e instituciones

Compromiso activo con la seguridad del agua (Proyecto Regional)

Aportes y perspectivas

TEC

UCR

UNA

UNED

UTN

Investigación en aplicación de metodologías para cuencas piloto.

Apoyar el equipo de trabajo para contar con una metodología de cálculo de caudal ambiental.

Aportes y perspectivas

EARTH

SENARA

Investigación en acuíferos. Balance hídrico subterráneo. Caudal base

Institución con mayor información en aguas subterráneas

A y A

Estaciones meteorológicas e hidrológicas

Podría compartir esa información

SETENA

Evaluación ambiental abarca los usos del agua. Disponibilidad de estudios técnicos

Disponicisión a compartir información

CNE

Aportes y perspectivas

IMN

Instrumentos de divulgación disponibles, personal especializado, información de estaciones.

Disposición a compartir información

COMCURE

CFIA

IGN

Información espacial: cartográfica, fotográfica histórica e información división política. (SNIT)

Disposición a compartir información

DINA

Propuesta metodológica temporal – diagnóstico. Aguas subterráneas SIMASTIR

Ente encargado de gestión de recurso hídrico

Aportes y perspectivas

UICN

Embajada
USA

PNUD

FUNDECOR

Aportes y perspectivas

TAA

Fiscalía AA

Puntos de encuentro

Disposición e interés por una gestión real del RH

Confianza entre los actores

Credibilidad de las instituciones

Conciencia de la necesidad para abordar el tema

Profesionales especializados

Experiencia adquirida

Instancias para gestión de la información (C. Hidrometeorología)

Plataforma de información

Avanzar en:

Agilizar la gestión de la información

Sostenibilidad del proyecto

Alianzas estratégicas

Rol institucional / escala del proyecto - fuente

Capacidad real del país

Equipo de trabajo

Dirección de Agua (Jesús Monge y Leonel Sanabria (representante unidad hidrológica)

ICE (José Zúñiga y Jorge Picado)

Tec (Fernando Watson y Isabel Guzmán)

A y A (Jorge Andrés Hidalgo Madriz y XX)

ESPH

SENARA

SETENA

UNESCO

IMN

IGN

PNUD

Vice Agua, Mares ... (Luis Carlos Martínez)

Tareas:

1. Una matriz de criterios que permitan tomar la decisión de cuál metodología utilizar para el cálculo de caudal ambiental.
2. Un manual que describa al detalle los pasos de cada una de las metodologías seleccionadas para el cálculo de caudal ambiental.

Plazos:

Primera entrega 6 meses.

Dirección de Agua

Guía de selección de metodologías para la estimación del caudal ambiental en Costa Rica

Elaborado por: Comisión de Caudal Ambiental
27-8-2018

Instituciones participantes:

- MINAE (Viceministerio de aguas, mares, costas y humedales)
- Dirección de Agua
- Instituto Tecnológico de Costa Rica,
- UNESCO
- Instituto Costarricense de Electricidad
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
- Secretaría Técnica Ambiental
- Instituto Geográfico Nacional
- Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento
- Empresa de Servicios Públicos de Heredia
- Instituto Meteorológico Nacional

Contenido

1	Acrónimos	1
2	Introducción	1
2.1	Antecedentes	2
2.2	Descripción del problema	3
2.3	Alcance	4
2.3.1	Objetivo general	5
2.3.2	Objetivos específicos	5
3	Metodología	5
4	Resultados y análisis	6
4.1	Análisis de metodologías	6
4.2	Definición de criterios	19
4.3	Asignación de metodologías recomendadas	22
4.4	Análisis complementarios	23
5	Disponibilidad de la información obtenida	24
6	Glosario	24
7	Referencias bibliográficas	33

1 Acrónimos

ENOS: El Niño Oscilación Sur.

DA: Dirección de Agua

DSE: Dirección Sectorial de Energía.

ITCR: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía.

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.

PSE: Plan Sectorial de Energía.

SNE: Servicio Nacional de Electricidad.

2 Introducción

Esta guía de selección de metodologías para la estimación del caudal ambiental en las fuentes de agua superficial, responde a un esfuerzo que Costa Rica viene haciendo por resguardar sus recursos naturales y gestionar su aprovechamiento de una manera equilibrada con las necesidades ecosistémicas y las actividades del ser humano y en correspondencia con las declaraciones y compromisos adquiridos en pro de la mejora ambiental. En ese sentido, el decreto de ley No. 30480 del 05/06/2002: Determina los principios que regirán la política nacional en materia de gestión de los recursos hídricos, los cuales deberán ser incorporados, en los planes de trabajo de las instituciones públicas relevantes. Específicamente el Artículo 1º de este decreto contempla los principios rectores los cuales son:

1. El acceso al agua potable constituye un derecho humano inalienable y debe garantizarse constitucionalmente.
2. La gestión del agua y sobre todo las reglas de acceso a este recurso deben regirse por un principio de equidad y solidaridad social e intergeneracional.
3. El agua debe ser considerada dentro de la legislación como un bien de dominio público y consecuentemente se convierte en un bien inembargable, inalienable e imprescriptible.
4. Debe reconocerse el valor económico del agua que procede del costo de administrarla, protegerla y recuperarla para el bienestar de todos. Con esto se defiende una correcta valoración del recurso que se manifieste en conductas de ahorro y protección por parte de los usuarios.

5. Debe reconocerse la función ecológica del agua como fuente de vida y de sobrevivencia de todas las especies y ecosistemas que dependen de ella.
6. El aprovechamiento del agua debe realizarse utilizando la mejor infraestructura y tecnología posibles de modo que se evite su desperdicio y contaminación.
7. La gestión del recurso hídrico debe ser integrada, descentralizada y participativa partiendo de la cuenca hidrográfica como unidad de planificación y gestión.
8. El Ministerio de Ambiente y Energía ejerce la rectoría en materia de recursos hídricos. La gestión institucional en este campo debe adoptar el principio precautorio o in dubio pro natura.
9. El recurso hídrico y las fuerzas que se derivan de este son bienes estratégicos del país.
10. Que es de suma importancia la promoción de fuentes energéticas renovables alternativas que reduzcan o eliminen el impacto de esta actividad sobre el recurso hídrico.

2.1 Antecedentes

En el año 1991, mediante acuerdo de la junta directiva del Servicio Nacional de Electricidad (SNE) se implementó en el país, la metodología de cálculo del caudal ambiental, la cual consiste en aplicar un porcentaje al caudal aforado en la fuente de agua y ese porcentaje asignarlo como cuota para uso de los ecosistemas asociados. Para los proyectos hidroeléctricos, ese porcentaje puede variar desde un 5% hasta un 10% del promedio anual, según las condiciones de los cuerpos de agua. Para el caso de concesiones aprovechadas en otros usos, el porcentaje aplicado al caudal aforado es de un 10%, esto con el propósito de mantener los ecosistemas propios de los cuerpos de agua y de mantener la dinámica natural con la mínima afectación.

En el año 1997, con la incorporación de la Dirección de Agua al Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), estos porcentajes se han mantenido y se han aplicado para el otorgamiento de las concesiones, sin embargo, debido a la dinámica natural de los flujos y la variación en las necesidades de la población y las actividades productivas, es necesario hacer una revisión de la metodología aplicada para mejorar y garantizar una distribución del agua más equilibrada y acorde con las necesidades, así como la integridad del ecosistema acuático.

En el año 2015, el MINAE a través de la Dirección Sectorial de Energía (DSE) implementó el Plan Sectorial de Energía (PSE), el cual, tiene una vigencia comprendida entre el 2015 y el 2030. El Plan

en uno de sus ejes incluye la revisión de la normativa legal vigente y el análisis de los criterios y métodos aplicados en la asignación de caudales de ambientales.

Para atender lo indicado en el PSE, en el año 2016 se conformó un equipo de trabajo integrado por representantes de distintas instituciones relacionadas con el recurso hídrico, de donde surgieron las recomendaciones necesarias para ser desarrolladas bajo el acompañamiento técnico de una comisión nacional de caudal ambiental.

Se entenderá como caudal ambiental, tanto la definición dada en la Declaración de Brisbane 2007: *El caudal ambiental fue definido como la cantidad, periodicidad y calidad del caudal de agua que se requiere para sostener los ecosistemas dulceacuícolas, estuarinos y el bienestar humano que depende de estos ecosistemas*, como la definición establecida en los proyectos de ley de Recurso Hídrico en Costa Rica: *Cantidad de agua expresada en términos de magnitud, duración, época y frecuencia del caudal específico, y la calidad de agua expresada en términos de rangos, frecuencias y duración de la concentración de parámetros clave, que se requieren para mantener un nivel técnicamente justificado de salud en el ecosistema y en condiciones socioeconómicas y culturales.*

2.2 Descripción del problema

La normativa que aplica el país en materia de caudal ambiental, no es del todo congruente con la dinámica natural del ciclo hidrológico ni con la operatividad de gestión del recurso hídrico y tampoco con el concepto de caudal ambiental. La distribución de las precipitaciones en el territorio nacional, por ejemplo, se ha afectado por la influencia de El Niño Oscilación Sur (ENOS). La variabilidad climática y el cambio climático son factores que intervienen en la dinámica del recurso hídrico y como consecuencia se tienen altos promedios de precipitación en unas zonas y pocas lluvias en otras.

Al aplicar la metodología de caudal ambiental vigente, se está considerando que en materia de agua, el país tiene un comportamiento uniforme, además, con la metodología actual no se consideran actores fundamentales como por ejemplo: los ecosistemas, los aportes de agua de otros cauces y la integralidad que se debe manejar en una cuenca.

Considerando que Costa Rica ha suscrito cerca de 45 tratados ambientales internacionales, y se han promulgado múltiples cuerpos normativos, es necesario avanzar en materia de caudal ambiental,

desde una perspectiva integral con miras a la protección del recurso hídrico a la obtención de los objetivos planteados en foros internacionales como por ejemplo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

2.3 Alcance

- En este documento, se muestra el producto de un proceso de revisión y análisis de muchas metodologías existentes, por medio de las cuales se han identificado los principales factores que tienen influencia sobre el cálculo del caudal ambiental. A partir de este análisis, se pretende definir el mecanismo de selección del método aplicable para la estimación del caudal ambiental, según el análisis de criterios que tienen que ver entre otros con, el uso del agua y la cantidad demandada.

El análisis del comportamiento de las concesiones de agua en los últimos años, específicamente los caudales concesionados para cada uso en los años comprendidos del 2012 al 2016, muestra el rango de escalas en los caudales otorgados, que van desde 0.01 litros por segundo, hasta 74799 metros cúbicos por segundo, razón por la cual, el caudal solicitado y el caudal disponible en la fuente, son dos elementos prioritarios en la definición del caudal ambiental. El contar con una gama de metodologías de cálculo de caudal ambiental, es una iniciativa capaz de responder a cada tipo de aprovechamiento y abarcar las diferentes condiciones que se puedan presentar. También es importante agregar que actualmente existe un faltante de información sobre las cuencas a nivel nacional, así como la información de balance hídrico que está desactualizada, por lo que será necesario ir instrumentando las cuencas paulatinamente. Mientras se logre avanzar en este proceso, se debe valorar la presente propuesta para adaptarse a los requerimientos planteados en los objetivos.

El trabajo de sensibilización a lo largo de varios años en este tema ha logrado reunir la experiencia de un equipo de trabajo y la disposición de las instituciones, en la elaboración de una guía desde una perspectiva integral, visualizando que puede ser una herramienta que se utilice para las concesiones otorgadas y las solicitudes que se gestionen en adelante.

La aplicación de la herramienta está condicionada a aspectos técnicos como la disponibilidad de la información, los aspectos legales y de modificación de la normativa vigente. Las propuestas de metodologías están fundamentadas en experiencias y modelos exitosos implementados en otros países

con las consideraciones de las condiciones específicas de Costa Rica. La Dirección de Agua realizó un convenio con el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), con el objetivo de validar diferentes modelos metodológicos en distintas cuencas del país.

2.3.1 Objetivo general

Elaborar una guía de selección de la metodología adecuada para la estimación del caudal ambiental con el fin de ser implementada de manera oficial en el proceso de otorgamiento de concesiones.

2.3.2 Objetivos específicos

- Analizar las distintas metodologías existentes para el cálculo del caudal ambiental.
- Definir los criterios que se deben seguir para aplicar las distintas metodologías de caudal ambiental.
- Construir el clasificador de metodologías de caudal ambiental.

3 Metodología

Se establecen en este apartado los pasos para definir la metodología de cálculo de caudal ambiental y cada uno de esos pasos responde al cumplimiento de los objetivos indicados, así, la revisión de la literatura para la conformación de un marco teórico, constituye la base para el análisis que permitirá definir qué ruta metodológica tomar en cada caso particular. Los criterios para la selección adecuada de metodología de cálculo de caudal ambiental se definen en función de los requerimientos de cada uno y las condiciones reales de la fuente analizada. Posteriormente, se definen los métodos ajustados a las condiciones de país y se definen los parámetros para su aplicación. En síntesis, los pasos a seguir para generar la guía metodológica son:

- Conformación de un equipo de trabajo multidisciplinario.
- Revisión la literatura existente en el tema.
- Análisis de las metodologías de caudal ambiental aplicadas en otros países.
- Análisis de los datos generados por la Dirección de Agua, para obtención de estadísticas que fundamenten los resultados.
- Definición de los criterios que se deben aplicar en el cálculo del caudal ambiental.

- Validación de las metodologías de cálculo de caudal ambiental.

Los pasos descritos, son constantemente evaluados por los miembros que integran el equipo de trabajo, posteriormente los resultados deben ser expuestos a los jefes de las instituciones que han participado durante el proceso.

4 Resultados y análisis

4.1 Análisis de metodologías

La aplicación de metodologías de estimación de caudales ambientales, responde a la necesidad de establecer límites para la alteración del régimen hidrológico, de forma que la cantidad de agua sea suficiente para mantener los diversos usos del agua, brindarles condiciones a las especies indicadoras de un ecosistema saludable y establecer el equilibrio entre el aprovechamiento y la conservación.

El análisis de referencias a nivel nacional e internacional en el tema del cálculo de caudales ambientales, muestran toda una gama de posibilidades metodológicas que se pueden agrupar según sus características y orientación en los siguientes grupos:

- Métodos Hidrológicos.
- Métodos Hidráulicos.
- Métodos Ecohidráulicos / Hidrobiológicos.
- Métodos Holísticos.

A continuación, se describe brevemente y se aportan ejemplos de metodologías en cada uno de los grupos:

Métodos hidrológicos:

Representan el abordaje más simple, menos costoso y más utilizado a nivel mundial. Estos se basan en el análisis de series temporales de 5, 10, 15, 25, 50 y hasta más años de caudales de un curso de agua, datos que pueden obtenerse del registro histórico de estaciones de aforo o mediante modelación numérica hidrológica-hidrodinámica, entre otras formas. Estos métodos se pueden dividir en dos

grupos: 1) los que establecen un único valor de caudal ambiental para todo el año o mes, y 2) los que establecen un régimen completo de caudales ambientales. Si bien son de menor costo, las relaciones entre los indicadores hidrológicos y ecológicos no han sido evaluadas. Los métodos de régimen completo de caudales proporcionan valores para cinco componentes del régimen hidrológico (magnitud, frecuencia, duración, momento y tasas de cambio de los diferentes caudales), los cuales son reconocidos como determinantes para la integridad ecológica de los sistemas fluviales (Lytle & Poff, 2004).

a) *Método de Tennant o de Montana:*

Fue aplicado en los Estados Unidos en la década del setenta y consiste en una recomendación de caudales mínimos basados en un conjunto de porcentajes de caudales medios anuales calculados para un aprovechamiento local y que son aplicados a diferentes porcentajes para los periodos octubre-marzo y para abril-septiembre. Las variables utilizadas son los periodos estacionales del año (húmedo o seco) y el caudal medio anual. Este método es particularmente adecuado para un nivel de planeación regional y es el más utilizado en Estados Unidos. Asimismo, comprende las siguientes etapas (Tennant, 1976):

- Determinación del caudal medio anual de aprovechamiento hidráulico local.
- Observación de cursos de agua durante los periodos en los cuales el caudal es aproximadamente 10%, 30% y 60% del caudal medio anual.
- Otros caudales podrán ser igualmente analizados, pero éstos permiten abarcar un rango de flujos que, de una manera general, sirven para la protección de los ecosistemas acuáticos y ripícolas de la mayoría de los cursos de agua.
- Utilización de la información obtenida para elaborar recomendaciones de caudales de mantenimiento en cursos de agua con base en los criterios que utiliza la metodología.

b) *Método de caudal base o de Nueva Inglaterra:*

Este método fue desarrollado en Estados Unidos por el Servicio de Pesca y Fauna en 1981. La recomendación de un caudal mínimo se basa en registros históricos de los caudales, a partir de la mediana calculada en el mes de agosto, que corresponde al registro más bajo, el cual constituye el caudal mínimo o básico por mantener a través de todo el año, con la excepción de los periodos de reproducción e incubación de especies piscícolas. En este periodo la mediana mensual o más baja para el caudal mínimo, corresponderá a la del caudal durante ese periodo, si es superior al caudal básico. Sin embargo, el cálculo de la mediana sólo es válido para cursos de aguas naturales en donde

exista un registro de caudales mayores a veinticinco años. En otras situaciones, en cursos de aguas naturales en los que se verifican derivaciones importantes en el tamaño de registros de caudales inferiores a veinticinco años, un caudal mínimo es un porcentaje de caudal definido en función del área de la cuenca hidrográfica. Cuando un caudal es menor a lo definido en este criterio, corresponderá al instantáneo para ese mismo periodo. Las variables utilizadas en este método son los periodos estacionales del año, el caudal mínimo anual y el rendimiento de la cuenca.

Fuente: (Loar y Sale, 1981; Russel, 1988, 1990)

c) Método de Caudal base:

Fue desarrollado para cursos de agua del río Cataluña (Norte de España) con base en un conjunto de cursos de agua representativos de varios tipos de regímenes hidrológicos que caracterizan la región, normalmente, son regímenes permanentes o temporales con características mediterráneas o no. Este método considera que el caudal es la única variable independiente del ecosistema y que la información contenida en series hidrológicas permitirá mantener las relaciones de funcionalidad con las otras variables. Por otro lado, la comunidad piscícola y los macroinvertebrados constituyen las variables con mayor grado de dependencia, pero que son considerados de mayor sensibilidad y con mayor valor indicador para evaluar las alteraciones del ecosistema. Las variables utilizadas en este método son las especies piscícolas, los macroinvertebrados y los caudales medios mensuales. (Palau et al., 1996)

d) Método de Northern Great Plains Resource Program (NGPRP):

El método norteamericano del programa de recursos de grandes planicies se desarrolló en 1964 para los ríos salmonícolas provenientes de las montañas rocosas del oeste de Estados Unidos. En la estimación de caudales mínimos se tienen en cuenta la postura y el crecimiento de los individuos y los flujos de descarga de lavados finos, se recomienda calcular los mínimos durante todos los meses del año, con base en la curva de duración de caudales durante el mes analizado. Este método no requiere de mucho trabajo de campo, puesto que las curvas de duración de caudales son obtenidas a partir de un registro de caudales medios diarios superior a veinte años, en el que los flujos de temporada seca se eliminan, ya que este método supone que las componentes biológicas más representativas de un sistema acuático son esencialmente mantenidas por las condiciones hidrológicas que se verifican en años normales y no para eventos extremos que ocurren durante periodos de corta duración. Un caudal mínimo recomendado para cada mes corresponde al que es excedido en el 90% del tiempo (o en el 84% del tiempo según Dougal, 1979 y Loar y Sale, 1981), exceptuando los meses de caudales

máximos, en los cuales el mínimo recomendado corresponde al que es igualado o excedido en el 50% del tiempo². Las variables utilizadas en este método son los periodos estacionales del año y los caudales medios diarios.

e) Método de Hoppe:

En 1975 Hoppe modificó el método norteno del programa de recursos de grandes planicies utilizando ecuaciones basadas en áreas de cuencas hidrográficas para lugares en donde no existían registros de caudales. El método se basa en porcentajes de curvas de duración de caudales medios diarios y en las etapas del ciclo de vida de las especies; siendo desarrollado inicialmente para especies salmonícolas. El flujo que es igualado o excedido el 40 % del tiempo, es el caudal recomendado para la postura, mientras que el flujo que es igualado o excedido el 80% del tiempo es el recomendado para el crecimiento. El flujo que es igualado o excedido el 17 % del tiempo es considerado un caudal de descarga para un periodo de 48 horas. Las variables utilizadas en este método son los caudales medios diarios y el ciclo biológico de las especies. (Castro et al 2006)

f) Método 7Q10:

Según Loar y Sale (1981), se recomendaron los caudales ecológicos basados en caudales medios mínimos observados durante un intervalo de tiempo de siete días, con un periodo de retorno de diez años. Este método es una variación del que inicialmente fue denominado 7Q2 y utiliza los mismos criterios, fue desarrollado para un periodo de retorno de dos años. Las variables utilizadas en este método son los caudales medios mínimos diarios. (Loar and Sale, 1981)

Métodos hidráulicos:

Son similares a los anteriores, pero incorporan parámetros hidráulicos como la velocidad y profundidad del agua y el perímetro mojado, etc. Los requerimientos mínimos de caudal se fijan generalmente como el punto de inflexión entre el incremento del caudal y del perímetro mojado o también fijando un porcentaje de hábitat a reservarse con un determinado valor de caudal. Los métodos hidrológicos e hidráulicos han sido desarrollados y aplicados por ingenieros.

a) *Método del Perímetro Mojado:*

Es un método usado como índice de disponibilidad de alimento para los peces, asumiendo que al maximizar el perímetro mojado habrá más alimento y hábitat aprovechable para la comunidad acuática. Requiere para su aplicación de la ubicación de un único transecto a lo largo del río que represente el sitio más sensible a los cambios de caudal. Para determinar el caudal ambiental se hace uso de la relación directamente proporcional entre el perímetro mojado y el caudal: a medida que aumenta este último se incrementa el otro desde un nivel base de caudal, hasta alcanzar un punto de inflexión, después del cual, el incremento del perímetro mojado crece muy lentamente hasta llegar a banca llena. Este punto de inflexión se toma como el de caudal óptimo o ambiental [Reiser et al., 1989], [Tharme, 1996], [King et al., 1999], [Palau, 2003], [Arthington y Zalucki, 1998]. Es un método de fácil aplicación, pero que no considera las condiciones de habitabilidad de las especies acuáticas, ni tampoco la variación de caudal en el tiempo, elementos fundamentales cuando se determina un caudal ambiental. (Agualimpia & Castro, 2006)

b) *Método de Múltiples Secciones (Multiple Transect Methods):*

En este método se corrige el problema de usar un solo transecto para definir los caudales ambientales en el río, pues utiliza más de uno para su aplicación. Requiere de mediciones en campo de velocidad, nivel, sustrato y cobertura a diferentes caudales y en diferentes secciones transversales, con el fin de determinar por medio de simulación hidráulica el cambio de estas variables hidráulicas (habitabilidad) con cambios en el caudal [Arthington y Zalucki, 1998]. Se considera un método conservativo, que frecuentemente estima caudales altos [Richardson, 1986], [Swales et al., 1994], pero es uno de los primeros enfoques donde se tiene en cuenta la variabilidad de caudales y el consecuente cambio de variables hidráulicas de importancia ecológica. (Agualimpia & Castro, 2006)

c) *Método de Idaho:*

Fue desarrollado por White & Cochnauer, 1975, para los grandes ríos de estado de Idaho en los Estados Unidos. Este método se basa en la supuesta pérdida de hábitat debido a la disminución del caudal, teniendo en cuenta las características requeridas por las especies seleccionadas como indicadoras del hábitat. En este método se definen las áreas críticas para la libre circulación, reproducción y crecimiento de especies piscícolas; a su vez, en cada área crítica se determinan secciones transversales en las que se miden velocidad, profundidad y tipo de sustrato. La caracterización física de cada sección transversal es realizada una sola vez para el caudal más bajo.

Se utiliza un modelo de simulación hidráulica, para generar los valores de profundidad, velocidad y perímetro mojado, para un amplio rango de caudales.

La comparación de las condiciones de hábitat simuladas con las necesidades de hábitat de las diferentes especies permite generar recomendaciones de caudales mínimos para la circulación, reproducción y crecimiento. Los caudales para la circulación sin restricciones de los individuos son basados en la profundidad mínima necesaria. Para la postura, el caudal que permite el ancho máximo disponible (valor medio obtenido de todas las secciones transversales) se usa como orientación para determinar el caudal mínimo. El caudal mínimo para el crecimiento de peces es determinado con base en el método de perímetro mojado. Las variables utilizadas en este método son el tipo de sustrato, la velocidad media, la profundidad y el perímetro mojado. (Agualimpia & Castro, 2006)

Métodos ecohidráulicos e hidrobilógicos:

Determinan un valor de caudal ambiental integrando el análisis hidrodinámico del tramo del curso bajo estudio y los requerimientos o preferencias de las especies que caracterizan el ecosistema fluvial. Los primeros métodos eco-hidráulicos se aplicaron a especies de peces de interés comercial o de interés para la conservación. Actualmente, también se toma en cuenta la comunidad biológica (grupos de especies de un mismo sitio) y el mantenimiento de la integralidad del ecosistema. Estos métodos requieren información de la topografía del curso de agua y de la ecología de las especies o comunidades que se quiere conservar, por lo que son más costosos, esto busca relacionar el ámbito hidráulico con el hábitat disponible de la especie indicadora. En general han sido desarrollados conjuntamente entre ingenieros y biólogos pesqueros.

a) Método de WRR Cover:

Fue desarrollado por Wesche en 1973, para trucha (*Salmo Trutta*), en pequeños ríos de montaña, con caudales medios iguales o inferiores a 30 m³/s, basándose fundamentalmente en la cobertura. Se aplica en secciones transversales en tramos de cursos de agua en estudio, siempre que existan alteraciones significativas de sus características. En cada sección transversal se caracteriza el sustrato y se realizan mediciones de profundidad, caudal y ancho superficial del flujo, así como las mediciones de longitud de la cobertura de las márgenes y la profundidad del agua a ella asociada. La gama de caudales seleccionados varía entre el 10% y el 100% del caudal medio (si no existen registros de

caudales, se utiliza el caudal medio de fin de verano) y se considera al menos cuatro valores de caudal. Este método tiene una sensibilidad ecológica elevada, después de haber verificado una buena correlación entre una cobertura y la biomasa piscícola. Las variables utilizadas en este método son la cobertura vegetal, los caudales medios anuales, la longitud y el área de la sección. (Wesche & Richard, 1980).

b) Método de Washington:

El método de Washington fue desarrollado para el Washington Department of Fisheries, (Departamento Pesquero de Washington, EE.UU), para especies salmonícolas; también es llamado método de las áreas favoritas. Utiliza la cartografía básica de los tramos de los ríos para determinar las áreas de postura y crecimiento de especies consideradas; se aplica para un rango de caudales de interés, considerando criterios biológicos de preferencia para una velocidad y una profundidad del flujo. Estos criterios definen los límites superiores e inferiores de los intervalos de valores seleccionados para las especies. Por lo menos, son considerados tres sitios representativos para desove o crecimiento, siendo definidas cuatro secciones transversales en cada sitio. A lo largo de cada sección transversal y de preferencia –también entre secciones– son realizadas mediciones de velocidad y de profundidad para mínimo cinco valores de caudal. Los valores obtenidos permiten definir isolíneas para la profundidad y velocidad. Este método constituye igualmente un ejemplo del caudal recomendado con base en criterios de mantenimiento del hábitat. Una ventaja es la forma de su gráfica, no siendo necesario correr la simulación hidráulica. Las variables utilizadas en este método son la velocidad, la profundidad de flujo, el caudal y el ciclo biológico de las especies. (Loar and Sale 1981 & Gordon et al, 1992)

c) Método de California o Método de Waters:

Fue desarrollado para la determinación de caudales mínimos para la postura y crecimiento de especies salmonícolas existentes en los cursos de aguas de California. Este método es semejante al método de Washington y también es conocido con el nombre de las áreas favoritas, en los cuales se elaboran dos mapas planimétricos: uno de velocidad y otro de profundidad del flujo, a partir de información obtenida en secciones transversales seleccionadas para muestreo (en un número mínimo de 600 mediciones), para los caudales de interés, en un número superior a tres, sin aplicar una simulación hidráulica. Son considerados factores de ponderación, valores entre cero y uno, para cada uno de los parámetros. Adicionalmente, puede ser incluida una caracterización del sustrato en cada sitio del

muestreo. Las variables utilizadas en este método son la velocidad, la profundidad de flujo, el área de la subsección, el sustrato. (Wesche & Richard, 1980)

d) Metodología IFIM-PHABSIM:

La *Instream Flow Incremental Methodology* (IFIM) es considerada por muchos como un avance significativo en la determinación de los caudales ecológicos, ya que sintetiza los aspectos más relevantes de los métodos de Washington y de California. A partir de ella se analizan conjuntamente variables de tipo hidráulico y biológico. La metodología IFIM puede ser definida como un conjunto de procesos analíticos y simulaciones elaboradas para prever los cambios en el hábitat de los ríos, debido a las alteraciones del flujo. La forma como se aplique esta metodología podrá ser determinada para cada caso, dependiendo de la especificidad de la situación y así generar varias alternativas, ya que a partir de un caudal inicial se trabaja con diferentes valores de éste al igual que se considera si la especie cuenta con el hábitat físico que requiere, además de trabajar con los datos hidráulicos, hidrológicos y biológicos pertinentes. (Reiser et al, 1989)

e) El PHABSIM (*Physical Habitat Simulation System o Sistema de Simulación de Hábitat Físico*):

Es derivado de la metodología IFIM y consiste en realizar simulaciones hidráulicas y de hábitat, lo que permite hacer variaciones en caudal y en la geomorfología del cauce las cuales están relacionadas con el índice de hábitat. Las variables utilizadas en este método son profundidad y velocidad del flujo, sustrato, cobertura y el ciclo de vida (alevinos, juvenil y adulto) o sus actividades específicas (reproducción, desove, alimentación o reposo), que se reflejan en las curvas de preferencia.

Métodos Holísticos:

Estos permiten determinar regímenes hidrológicos necesarios para mantener la integralidad del ecosistema, además de los usos sociales y productivos. Se basan en un manejo integrado de todos los factores biológicos, abióticos, socioeconómicos y el espectro completo del régimen hidrológico, incluyendo tanto su variabilidad espacial como temporal. Por lo tanto, son esencialmente interdisciplinarios, por ejemplo, una de las metodologías holísticas más recientes y elegida en este documento es DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformation), la cual consiste en cuatro módulos: biofísico, sociológico, desarrollo de escenarios y económico (King et al. 2003). El

módulo biofísico implica la descripción de los elementos naturales y el funcionamiento del río y establece las bases para predecir cambios relacionados a modificaciones del caudal. El módulo sociológico identifica la población en riesgo, describe los usos del río y los perfiles de salud, que contribuyen a predecir los impactos sociales de los cambios en el río. Con base en esto, en el tercer módulo se identifican escenarios hidrológicos posibles y se describen las potenciales consecuencias biofísicas y sociales. Por último, el cuarto módulo calcula los costos de compensación y mitigación de los impactos en la población en riesgo para cada escenario. El resultado es una serie de escenarios descritos que pueden ser utilizados para la toma de decisión.

a) Método DRIFT:

Metodología desarrollada en Sudáfrica, la cual brinda una perspectiva completa de las variaciones que ocurren río abajo en diferentes escenarios de regímenes de caudal. Esta perspectiva es muy importante para la toma de decisiones, ya que de antemano se conocerán todas las posibles respuestas del ecosistema y se podrá llegar a un consenso en el que se escoja la opción más conveniente para el medio ambiente (Pantoja, 2017).

El proceso dentro de la metodología DRIFT se divide en cuatro módulos (King et al. 2008):

- **Biofísico:** Describe la naturaleza y la forma en que funciona el río y establece las bases necesarias para predecir los cambios relacionados con las modificaciones de caudal.
- **Sociológico:** Se identifican los usos y costumbres asociados al río y la población que los practica. Se desarrollan las bases para predecir cuáles serían los impactos sociales de producirse ciertos cambios en el río.
- **Desarrollo de escenarios:** Identifica los posibles escenarios y las consecuencias ecológicas, sociales y económicas, sobre los mismos de producirse una alteración en el caudal.
- **Económico:** Los daños causados a la población en riesgo son evaluados desde el punto de vista financiero. Se toman en cuenta todos los escenarios posibles para calcular los costos de compensación y mitigación de los daños.

Esta metodología intenta abarcar todas las posibilidades existentes de regímenes de caudal, para de esa manera tomar la decisión que menos daños conlleve, lo cual la vuelve una metodología compleja, por tanto, se necesita contar con un grupo extenso e interdisciplinario de profesionales, lo cual eleva el costo de su aplicación, y a la vez lo limita para ciertos países con mayor capacidad económica, es por esto que su aplicabilidad dependerá del lugar en el que se desee utilizar. (Pantoja, 2017)

b) Método RANA-REGINA:

Esta metodología fue desarrollada por el Instituto Costarricense de Electricidad con el fin de contar con una herramienta para estimar el caudal de compensación de los proyectos hidroeléctricos que están en diferentes etapas de factibilidad, y se considera holística porque en ella se integran análisis de la información hidrológica, biológica y socio-económica de los ríos de Costa Rica. Su nombre obedece a dos componentes de análisis establecidos en los años 2007 (Krasovskaia, I. y Rodríguez, C. 2007) y 2014 (Krasovskaia, I. et al., 2014), RANA y REGINA respectivamente. Por medio de esta metodología se tiene la posibilidad de analizar las condiciones iniciales, o línea base, y el efecto de las diferentes alternativas de regulación en las condiciones físicas, biológicas y socioeconómicas en un sector específico de interés, o en la integralidad del río estudiado. Es necesario recalcar que la robustez de la metodología reside en buena parte en la información hidrológica que ha generado el ICE a través de los años. Con el componente RANA se logró la estimación de los diferentes descriptores de caudal (media anual, varianza y curvas de duración) en cualquier punto a lo largo del río. Por su parte, el componente REGINA incluyó métodos de regionalización de los caudales mínimos y crecientes, así como las curvas de duración. La particularidad de este segundo componente es que el análisis se extendió al resto del ciclo hidrológico dado que el anterior estaba restringido al período de estiaje.

El método planteado consiste en desarrollar los pasos que se describen a continuación, y el flujo de actividades, que refleja la interacción de las diferentes áreas de especialidad, se presenta en la figura 1:

1. Identificar los principales usos del río y definir cuáles y cuántas especies indicadoras y usuarios se utilizarán para estudiar esas actividades.
2. Seleccionar sitios de control donde recopilar información sobre las condiciones del río que esas especies y usuarios prefieren para realizar esas actividades.
3. Establecer reglas con base en esas preferencias para evaluar distintas condiciones de caudal en los sitios seleccionados. Las reglas consisten en rangos de profundidad y velocidad del agua, asociados con condiciones óptimas, regulares o malas para realizar las actividades definidas.
4. Estimar el régimen de caudal en los sitios de control para evaluar las reglas de preferencia ante variaciones de esos niveles de agua.
5. Realizar un modelado hidráulico de los sitios de control con los regímenes de caudal estimados, para obtener mapas de profundidad y velocidad en distintas condiciones de caudal.
6. Evaluar las reglas de preferencia sobre los mapas de profundidad y velocidad obtenidos.
7. Evaluar los regímenes de caudal correspondientes a los posibles esquemas de operación del proyecto, y compararlos con la línea base. Así se obtiene una noción del efecto que los distintos esquemas de operación pueden generar sobre los usos del río.

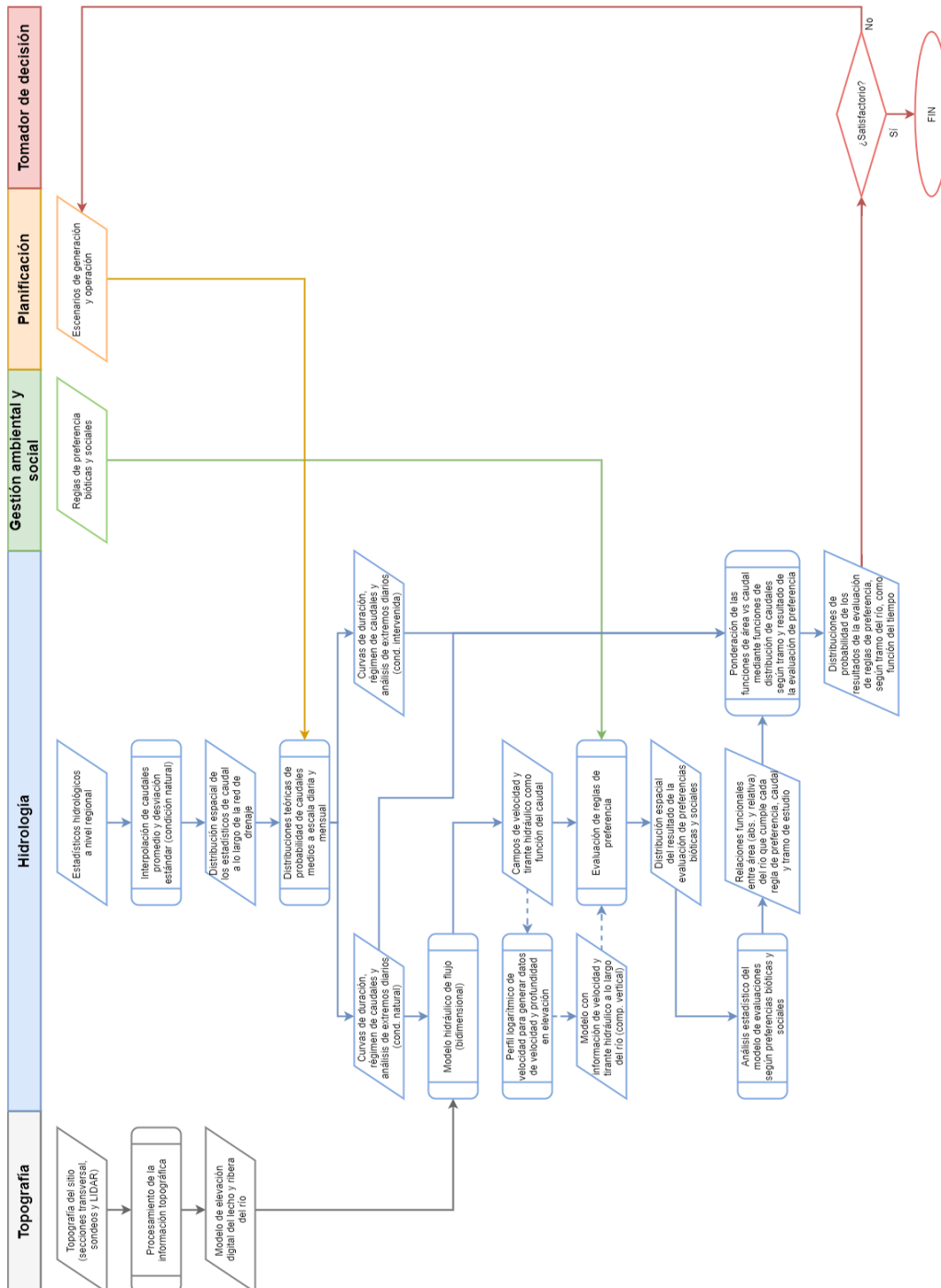


Figura 1. Diagrama de flujo de actividades especializadas.

Para la implementación de esta metodología, es necesario llevar a cabo estudios de las características del flujo en varios sectores de los ríos estudiados, seleccionados con base en su importancia para el régimen hidrológico, aspectos ecológicos y socioeconómicos. A través del trabajo de campo las áreas de Biología y Sociología se identificaron los principales usos del río, así como las especies y usuarios indicadores para hacer el estudio. Las “especies indicadoras” podrían ser los peces presentes en el río, u otro indicador, que se considere más sensible a los cambios de caudal, mientras que los “usos principales” son las actividades que poseen la importancia social más alta y que también son sensibles a los cambios de caudal. Las demandas biológicas de hábitat pueden establecerse con la ayuda de un panel de expertos y estudios de campo extensivos. La información sobre las demandas socio-económicas con respecto al caudal del río se obtiene por medio de inventarios de campo y talleres con partes interesadas y el régimen de caudal en los sitios de control se modeló mediante curvas de duración, utilizando distribuciones de probabilidad y los mapas creados durante el proyecto de caudales de compensación

Los sitios de control, generalmente pozas, se seleccionan con base en su ubicación dentro del tramo crítico, entendiendo éste como el sector del río comprendido entre el sitio de presa y la restitución. Este sitio se denomina “sector crítico” debido a que va a ser alterado por la modificación de su caudal, pudiendo afectar la ecología y las actividades socioeconómicas que se desarrollan en la zona.

La metodología establece reglas de preferencia que se definen como los rangos de profundidad y velocidad del agua asociados con el desarrollo normal de las especies indicadoras y los usos principales

El modelado hidráulico del tramo de interés permite estimar las velocidades de flujo y las profundidades para un caudal dado en los sitios específicos a lo largo del río, y la vinculación de éstos parámetros a las demandas de hábitat y uso socioeconómico, se emplea para estimar el área útil en condiciones de flujo natural y de regulación.

La fase final del evalúa la variación estacional del área útil para las especies acuáticas y los usos del agua condicionados a los caudales naturales o regulados. La comparación de la relación entre el área útil y la conectividad en cada sector del río con las demandas identificadas, permite comparar el impacto de los diferentes escenarios de regulación de una forma integral.

El método presenta un enfoque amplio para evaluar los efectos de las diferentes alternativas de regulación de caudal en la vida acuática y las actividades socioeconómicas de la población ribereña a lo largo del año, para facilitar la elección del esquema de regulación con un nivel de menor riesgo.

La metodología sigue el concepto de gestión del caudal adaptativo, el cual prevé un seguimiento continuo de los resultados de la decisión elegida y un ajuste en función de los nuevos conocimientos.

c) Método de Building Block – Enfoque Bottom-up:

Se realiza con base a estudios multidisciplinarios realizados del sitio, con el fin de comprender la relación caudal-características hidráulicas, éste tipo de análisis es a mediano o largo plazo y requieren de inversiones considerables. Es esencialmente un enfoque prescriptivo, diseñado para construir un régimen de flujo para el mantenimiento de un río en una condición predeterminada. Este método ha proporcionado además un impulso para la evolución de varias metodologías alternativas de caudal ambiental de tipo holístico. Generalmente se trabajan desde 1 hasta 5 transectos dependiendo del tamaño del área de estudio, en cada transectos se debe analizar el tipo de sustrato, vegetación rarápía y de macrófitas, además de información hidrológica, como curvas de duración de caudal, periodo de retorno, otra información que se debe recopilar es la entrada de agua subterránea estos corresponde al primer bloque o fase (Castro et al, 2006)

En el segundo bloque se procede a analizar la información para establecer la relación entre los caudales y las características hidráulicas, la morfología del canal y los biotopos para generar propuestas de un caudal ambiental que garantice el ciclo de vida de la fauna acuática (peces, macroinvertebrados, renacuajos, etc). También debe garantizar los usos socioeconómicos y culturales del río, además de los ciclos vegetativos de las especies que se encuentran en la ribera, cuyo ciclo de vida dependa de la disponibilidad del agua en determinada época del año, y por último la navegabilidad en los casos que aplica (Aguilera y Pouilly, 2012). La principal ventaja que tiene este método es que al ser holístico, toma en cuenta una gran cantidad de aspectos del régimen fluvial, lo que lo hace que tenga una mayor probabilidad de sostenibilidad a lo largo del tiempo.

Valoración de la Dirección de agua

Esta valoración está basada en los registros de concesiones y estadísticas realizadas por la Dirección de Agua para caudales pequeños menores a 1 l/s, dichos estudios han demostrado que la valoración a dichas fuentes, así como el trabajo realizado para la determinación y comprobación de los usos, ha permitido comprobar la protección del recurso hídrico, determinándose que en promedio un 46% del caudal total de la fuente se encuentra concesionado, es decir comprobándose un promedio del 54% del total de la fuente discurre libremente y de forma natural por el cauce.

Este es un valor mayor al establecido por la aplicación del 10% de caudal ambiental aplicado hasta el momento, lo cual demuestra la labor realizada hasta el momento por parte de la Dirección de Agua, en la gestión del recurso hídrico.

La aplicación dependerá de las condiciones en que se encuentre la fuente y su entorno, permitiendo al técnico identificar los posibles factores de riesgo los cuales hasta el momento han permitido obtener los resultados indicados a la hora de evaluar el permiso de concesión.

4.2 Definición de criterios

La Dirección de Agua como ente rector en el recurso hídrico es quien vela por la protección y aprovechamiento del recurso hídrico de una manera integral y sostenible, por eso es que se busca establecer un caudal ambiental como un principio de protección del recurso para la subsistencia de los hábitats tanto ecológicos como los humanos.

La definición de los criterios socioambientales, para definir las metodologías aplicables del caudal ambiental, está basado en la clasificación de los caudales concesionados por la Dirección de Agua, las mismas mediante un proceso valoración de los caudales y su recurrencia en cada valor nos permite determinar gráficamente los valores de rangos de análisis, permitiendo la clasificación de los registros de los caudales concesionados por la Dirección de Agua.

A continuación, se muestra la frecuencia de registros en función del caudal otorgado.

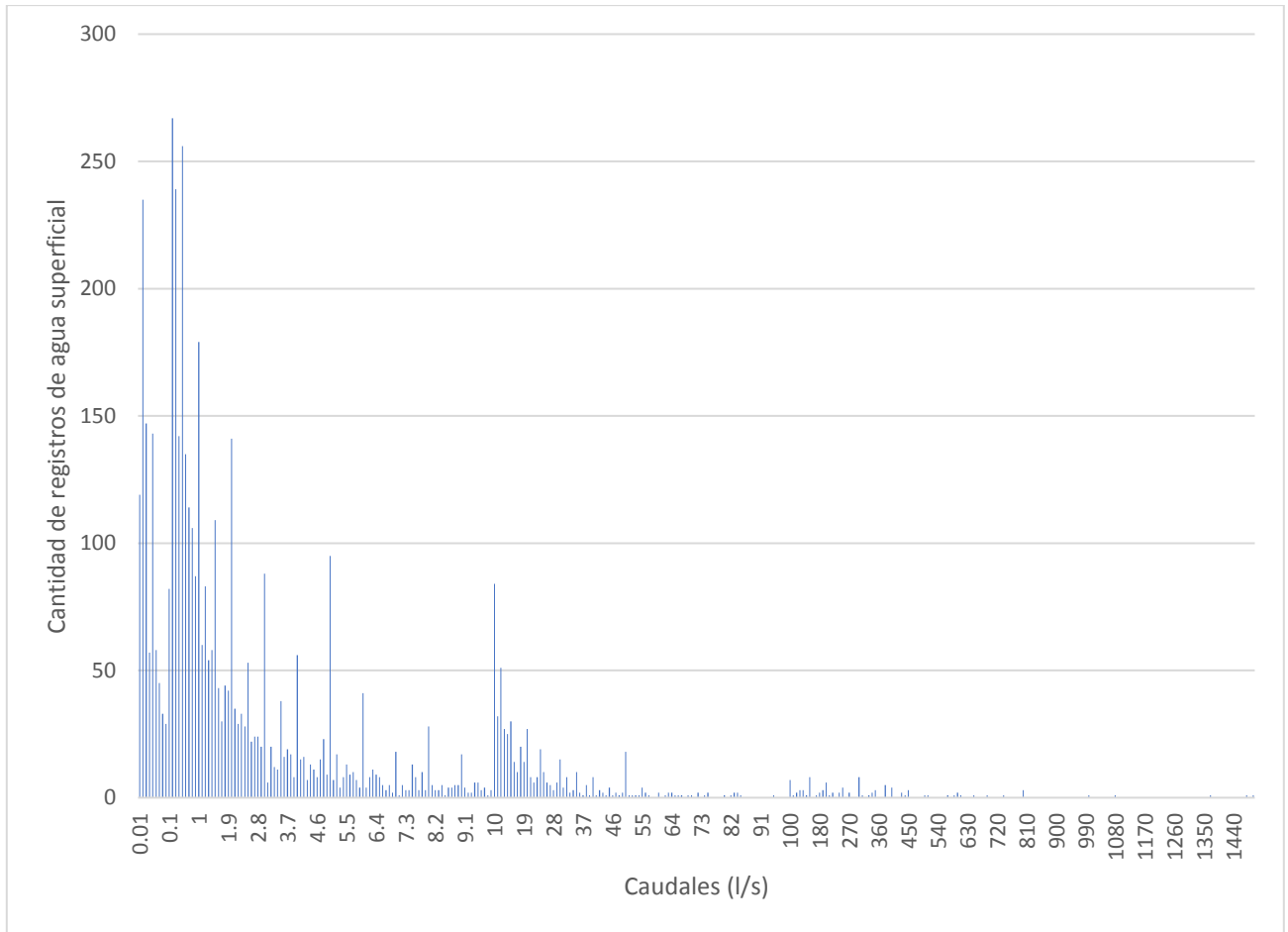


Figura 2. Cantidad de registros de agua superficial según el caudal otorgado.

Del cuadro anterior se obtiene los rangos de los caudales, los cuales se muestran por separado en el siguiente cuadro, y que se utilizarán como parte de la selección en el cuadro de variables socioambientales.

Cuadro 2. Categorización de caudales (l/s), registrados en la Dirección de Agua del MINAE.

Id	RANGOS DE CAUDALES SOLICITADOS EN L/S
1	0.00 a 01.00
2	1.01 a 50.00
3	50.00 a 100.00
4	100.00 a 500.00
5	500.00 a 1000.00
6	1000.00 a (+)

Los criterios socio ambientales para evaluar las solicitudes de concesión de aprovechamiento de agua, se resumen en el Cuadro 3, donde también se asigna el factor o puntaje a asignar según sea la condición.

Cuadro 3. Criterios socio-ambientales a evaluar para uso agroindustrial.

Criterio Socio-ambiental	Condición	Puntaje	Detalle
Tipo de Cauce	Afluente	1	La ubicación de la toma es en un afluente
	Cauce principal	25	La ubicación de la toma es en un cauce principal
Ubicación en la cuenca	Alta	1	Ubicación en la parte alta de la cuenca
	Media	25	Ubicación en la parte media de la cuenca
	Baja	50	Ubicación en la parte baja de la cuenca
Caudal Solicitado (l/s)	0.00 a 01.00	1	Selección de categoría según el caudal solicitado
	1.01 a 50.00	50	
	50.00 a 100.00	100	
	100.00 a 500.00	150	
	500.00 a 1000.00	200	
	1000.00 a (+)	250	
Obra en Cauce	Ninguna	0	Mínimo o ningún tipo de intervención sobre el cauce, captación pequeña u obras ligeras con materiales no fijos al cauce
	Parcial	25	Obras en cauce de tipo temporales con periodos de usos menores a 6 meses, o que no obstaculice más del 50% de la sección transversal del cauce.
	Presa < 1m	50	Obras en cauce con una altura menor a 1 m, sobre el fondo del cauce.
	Presa de 1 a 5 m	75	Obras en cauce con una altura entre 1m a 5m, sobre el fondo del cauce.
	Presa > 15 m	150	Obras en cauce con altura mayor a 15m, sobre el fondo del cauce
Tipo de Consumo	No Consuntivo	1	Aprovechamiento del recurso extrayendo de la fuente para su uso, devolviendo la misma
	Consuntivo	25	Aprovechamiento del recurso extrayendo o consumiendo desde la fuente de agua, sin devolución de la misma

Sistema de Reúso de Agua	Total	1	El agua es aprovechada adicionalmente en otro uso
	Parcial	25	Parte del agua utilizada se aprovecha nuevamente
	Ninguno	50	Sin ningún tipo de reúso del agua
Conflicto uso	Ninguno	0	No se presenta conflicto (Situación de carácter social que pueda desenvolver en una problemática por el recurso agua, ya sea por afectar un servicio ambiental, por escasez del recurso, por usos múltiples en el mismo sistema, por situaciones de género, multiculturalidad, valores culturales y otros).
	Leve	100	Se presenta una situación de conflicto, donde existe antecedentes de denuncias existentes o anteriores.
	Alto	200	Se presenta una situación de conflicto, a nivel social o de acción colectiva por el aprovechamiento de la fuente.
Afectación sobre los ecosistemas frágiles	No	0	Se considera que el caudal solicitado no representa un riesgo sobre ecosistemas frágiles.
	Si	250	Se considera que el caudal solicitado representa un riesgo sobre ecosistemas frágiles.
Nivel de amenaza de eventos Extremos secos por cantones	Bajo	0	Clasificación de amenazas por eventos extremos Secos por cantones, realizado por el Instituto Meteorológico Nacional. Boletín Meteorológico mensual, agosto 2011 y julio 2014.
	Medio bajo	25	
	Medio	50	
	Medio alto	75	
	Alto	100	

4.3 Asignación de metodologías recomendadas

La clasificación de las metodologías, se analiza desde el punto de vista de impacto a la fuente a través del caudal aprovechado, considerando que la extracción de un caudal para aprovechamiento, implica un impacto directamente sobre la fuente aprovechada, ya que un cuerpo de agua responde a un área colectora de características variables, donde coexisten los hábitat ecológicos, las poblaciones

humanas, las actividades económicas y sociales por lo cual se debe tener especial cuidado en los proyectos que deseen aprovechar el recurso hídrico.

En el Cuadro 4, se define la recomendación de aplicación de las metodologías en función de los puntajes alcanzados según los criterios previamente identificados tanto del análisis de los datos de concesión por Dirección de Agua, como por las condiciones socio-ambientales.

Cuadro 4. Metodologías recomendadas según puntaje.

Puntaje alcanzado	Metodología Recomendada
< 161	Valoración DA
161 - 300	Hidrológica - Hidráulica
301 - 450	Hidrobiológica
> 450	Holística

Esta guía metodológica enfatiza los criterios para seleccionar la metodología de determinación de caudal ambiental que mejor se adapte a las condiciones de cada solicitud de concesión, de esta manera se podrá garantizar el cumplimiento de un principio básico de administración del recurso hídrico que es respetar la funcionalidad de los ecosistemas como una medida de previsión para beneficio de la población.

4.4 Análisis complementarios

Corresponde a la Dirección de Agua, como ente administrador de las concesiones de agua en Costa Rica, la función de evaluar, para cada solicitud de concesión, las condiciones propias de la cuenca, tomando en consideración los principios de la gestión integral del recurso hídrico, así como los efectos acumulativos de otras concesiones producto de las condiciones antropogénicas.

Es importante aclarar que aun cuando una solicitud de concesión implique la aplicación de una metodología Hidráulica o Hidrológica, podría requerirse atención hacia alguna conflictividad de índole ambiental o social en una escala menor con respecto a lo requerido para las metodologías Hidrobiológicas y Holísticas, dicho abordaje deberá ser contemplado por parte del solicitante de la

concesión y en su defecto podrá ser solicitado como análisis complementario por parte de la Dirección de Agua.

5 Disponibilidad de la información obtenida

El objetivo de establecer una guía para la determinación del caudal ambiental para los cuerpos de aguas superficiales es que no solamente se proteja el recurso hídrico y su relación con el ambiente, como se indicó en los objetivos, si no que el mismo pueda establecerse de una manera técnico-científica que pueda ser evaluado y revisado contantemente, poniéndose a la disposición y conocimiento del público en general y entes o instituciones que deseen realizar evaluaciones de los mismos, corroborando o bien generando nueva información.

Para ello la Dirección de Agua no solamente deberá establecer el valor de caudal ambiental mediante los estudios indicados bajo esta guía, si no que además deberá evaluar en conjunto y de manera integral con la gestión del recurso hídrico los estudios realizados en las cuencas por las Unidades Hidrológicas. Esta evaluación por unidad hidrológica es un primer intento de establecer valores de caudal ambiental en cuencas y microcuencas con el fin de mapear dichos valores a nivel Nacional, estableciendo puntos de control de valores de caudal ambiental dentro de las cuencas, valores que se estarán revisando en conjunto con la generación de los valores obtenidos mediante esta guía.

Esta información estará disponibles a través de la web, como por ejemplo en visor de mapas de la Dirección de agua. Este sistema permite mejorar no solamente la cantidad si no además la calidad de la información, permitiendo una constante mejora en la determinación del caudal ambiental.

6 Glosario

Acequia: Canal artificial a cielo abierto que sirve para conducir y distribuir agua de riego para una explotación agrícola. Normalmente su capacidad es inferior a 0.50 m³ / s. Sinónimos de acequia: paja de agua, atarjea, canal, derivación, canal, ramal. Usadas antiguamente como medio de distribución de agua de consumo humano.

Acueducto: Sistema de tubería, accesorios y obras necesarias para la captación, conducción, tratamiento y distribución de las aguas para abastecimiento.

Acuífero: Formación porosa (capa o estrato), de roca permeable, arena gravilla, capaz de almacenar y transmitir cantidades apreciables de agua.

Acuífero colgado: acuífero que contiene un volumen de agua subterránea de dimensionadas pequeñas, soportada por un estrato de una conductibilidad hidráulica menor.

Acuífero confinado: acuífero limitado por formaciones de bajas conductibilidades hidráulicas y tiene una presión mayor que la atmosférica.

Acuífero libre o no confinado: Es aquel en el que su límite superior se encuentra a presión atmosférica.

Acuífero semiconfinado: Acuífero cubierto por un estrato de una conductibilidad hidráulica menor, por la cual se puede drenar agua dependiendo de los niveles piezométricos.

Aforo: Medición del caudal de una corriente o naciente y en un momento dado, el cual se realiza mediante diferentes métodos: Aforo con flotadores, Aforo volumétrico, Aforo con químicos, Aforo con vertedores, Aforo con correntómetro o molinete, Aforo mediante estructuras hidráulicas de un sistema, Aforos con sensores.

Agente contaminante: Todo aquel elemento cuya incorporación a un cuerpo de agua natural conlleve el deterioro de la calidad física, química o biológica de este, o de la biodiversidad asociada.

Agua residual: Agua que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes.

Agua subterránea: El agua por debajo de la superficie del terreno que satura por completo las rocas permeables por debajo del nivel de saturación y fluye bajo la acción de la pendiente o gradiente hidráulica.

Agua superficial: Agua que fluye o se almacena en la superficie del terreno. Exceptuando el agua marina, se pueden distinguir tres tipos de agua: el agua de escorrentía, la retenida en reservorios naturales o artificiales y el agua de estuarios. Estas aguas se originan a partir del agua de precipitación atmosférica, y de afloraciones de agua subterránea. En el caso de los estuarios, el origen se debe al encuentro entre las aguas fluviales y las marinas.

Alteración eco-hidrológica: Modificación inducida de la calidad, cantidad y temporalidad de los regímenes hidrológicos causada por infraestructura hidráulica, carretera y urbana, principalmente, lo cual altera la provisión de servicios ambientales.

Año hidrológico: Período de doce meses comprendido entre el primero de mayo con el inicio de las lluvias y termina en abril al final de la estación seca, condición repetida cíclicamente para Costa Rica.

Área Silvestre: Se refiere al lugar con presencia o proximidad a Ecosistemas frágiles, humedales, áreas protegidas, tanto en el sistema estatal como privado.

Avenida: Aumento repentino del volumen y velocidad de la corriente en un río debido a escurrimientos generados por la lluvia cíclica o extraordinaria, también se le conoce como crecida.

Biótico: Perteneciente a organismos vivos. Componente del ecosistema.

Canal: Conducto por el cual el agua fluye en una superficie libre y de acuerdo con su origen un canal puede ser natural o artificial.

Cauce: Depresión natural de longitud y profundidad variable en cuyo lecho fluye una corriente de agua permanente o intermitente, definido por los niveles (huella) de las aguas alcanzadas durante las máximas crecidas ordinarias. Definido en la Ley de Aguas como el terreno que cubren sus aguas en las mayores crecidas ordinarias en un periodo de un año hidrológico. (Artículo 69 y 70, Ley de Aguas N°276).

Caudal: Volumen de agua por unidad de tiempo. Se puede dar en litros por segundo o en metros cúbicos por segundo, según la magnitud del volumen.

Caudal Ambiental: Se refiere al régimen hídrico necesario para sustentar los ecosistemas y sus beneficios. Según la declaración de Brisbane 2007 son los flujos de agua, el momento de aplicación y la calidad del agua precisos para mantener los ecosistemas de agua dulce y de estuarios, así como los medios de subsistencia y bienestar de las personas que dependen de tales ecosistemas.

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 de Estiaje: Es el caudal promedio de los caudales mínimos del registro en época seca de una fuente dentro del año hidrológico.

Caudal mínimo remanente (CMR): Es el caudal no derivable de una fuente producto de la particularidad hidrográfica de cada región, de tal forma que se garantice un caudal mínimo continuo y permanente aguas abajo de todo aprovechamiento a lo largo del cauce.

Caudal Mínimo Aceptable (CMA): Es el límite inferior del caudal de un río que podría mantenerse en un cauce sin que se comprometa la condición de integridad del ecosistema y sus usos sociales.

Ciclo Hidrológico: Circulación natural, regular y sucesiva del agua entre el mar, la atmósfera y la tierra, fundamento esencial a la vida y transformación del planeta.

Coefficiente de escorrentía (C): Valor adimensional que establece la relación fija entre la tasa de escorrentía pico y la tasa de lluvia para la cuenca de drenaje, depende de las características y condiciones de cobertura del suelo, de la intensidad de lluvia, proximidad del nivel freático, el grado de compactación del suelo, la porosidad del subsuelo, la pendiente del suelo y el almacenamiento por depresión.

Coefficiente de evapotranspiración del cultivo (Kc): Valor empírico para cada cultivo que integra al conjunto de variables que operan en la relación de evapotranspiración respecto al crecimiento vegetativo. (Manual técnico del Departamento de Aguas, Gaceta N°98, del 20 de mayo del 2004)

Concesión: Es el instrumento o figura jurídica por medio de la cual el estado autoriza en forma temporal el aprovechamiento de aguas a personas privadas o públicas; físicas o jurídicas.

Conflicto de uso: Situación de carácter social que pueda desenvolverse en una problemática por el recurso agua, ya sea por afectar un servicio ambiental, por escasez del recurso, por usos múltiples en el mismo sistema, por situaciones de género, multiculturalidad, valores culturales y otros temas de conflicto.

Conservación de los recursos hídricos: Administración, protección, mantenimiento, recuperación y mejoramiento de los recursos hídricos, en cantidad, calidad y oportunidad, a través de una gestión integrada del recurso.

Contaminación de las aguas: Incorporación de agentes contaminantes a los cuerpos de agua a través de vertidos o descargas directas o indirectas, o de cualquier tipo de sustancia o energía, cuyas características provoquen o puedan provocar alteraciones nocivas en la calidad física, química y biológica de las aguas

Cuenca hidrográfica: Unidad territorial delimitada por la línea divisoria de sus aguas, las cuales drenan superficial o subterráneamente hacia una salida común. Cuando los límites de las aguas subterráneas no coincidan con la línea divisoria de aguas, dicha delimitación incluirá la proyección de las áreas de recarga de las aguas subterráneas, las cuales fluyen hacia la cuenca delimitada superficialmente. Si las aguas de una cuenca tienen como salida común algún punto del litoral, su zona de influencia marítima se considera como proyección de la cuenca hidrográfica respectiva, según lo determinen los estudios técnicos pertinentes.

Cuerpo receptor: Es todo aquel manantial, río, quebrada, arroyo, permanentes o no, zona de recarga, lago, laguna, marisma, embalse natural o artificial, estuario, manglar, turbera, pantano, agua dulce, salobre o salada, donde se vierten aguas residuales o pluviales.

Dotación: Cantidad de agua por unidad de producción o consumo, determinada por las necesidades de la particularidad de cada uno de los usos; considerando variables de eficiencia en su aprovechamiento integral.

Drenaje: Evacuación del agua superficial, subsuperficial o subterránea de un área de terreno determinada, ya sea por gravedad o por bombeo.

Ecosistemas frágiles: Espacio geográfico que en función de sus condiciones de geopotencialidad, de capacidad de uso del suelo, de ecosistemas que lo conforman y su particularidad sociocultural; presenta una capacidad de carga restringida y con algunas limitantes técnicas que deberán ser consideradas para su uso en actividades humanas. También comprende áreas para las cuales, el Estado, en virtud de sus características ambientales ha emitido un marco jurídico especial de protección, reserva, resguardo o administración.

Eficiencia de riego: Mide la relación del agua disponible para la planta y el agua total destinada al proyecto de riego.

Efluente: Un líquido que fluye fuera del espacio confinado que lo contiene. En el manejo de aguas residuales se refiere al caudal que sale de la última unidad de conducción o tratamiento.

Embalse: Depósito de agua, natural o artificial, usado para el almacenamiento, la regulación y el control de los recursos hídricos.

Escurrimiento: Componente del Ciclo Hidrológico, agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente, para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

Especies migratorias o en condición de peligro o amenaza: Presencia de especies acuáticas migratorias, así mismo especies de fauna amenazada o en peligro de extinción que dependen del sistema primario y que deban ser consideradas en condiciones particulares.

Estudio hidráulico: Análisis que se realiza previo al diseño de cualquier obra civil de tipo hidráulico, mismo que se basa en el caudal de diseño calculado mediante un estudio hidrológico.

Estudio hidrológico: Análisis realizado por un profesional del ramo para resolver los problemas prácticos que se presenten en el diseño, planeación y operación de estructuras hidráulicas de aprovechamiento de agua o cauce y que tiene como fin de determinar el caudal de diseño. El contenido de los parámetros mínimos requeridos, amplitud y profundidad del estudio dependerán del objetivo final de la obra o trámite requerido.

Evapotranspiración: Cantidad de agua que retorna a la atmósfera, a través de la transpiración de la vegetación como por de la evaporación del agua en el suelo. Su magnitud depende del agua realmente disponible, es decir de la que se ha logrado retener para el consumo de la vegetación.

Fuente: Corriente o masa de agua denominada manantial, río, quebrada, arroyo, permanentes o no, zona de recarga, lago, laguna, marisma, embalse natural o artificial, estuario, manglar, turbera, pantano, agua dulce, salobre o salada.

Fuente de Flujo intermitente: Corriente de agua que dentro del año hidrológico escurre agua en forma continua durante algunos meses y seca en otros de forma natural, comportamiento de cíclico año a año.

Fuente de Flujo permanente: Corriente de agua que dentro del año hidrológico escurre en su cauce en forma continua, permanente y natural, sin aportes artificiales

Fuerza Hidráulica: Agua destinada al aprovechamiento en el desarrollo de energía mecánica, o bien para producir electricidad.

Hidrología: Es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente.

Humedales: Ecosistemas con dependencia de regímenes acuáticos, naturales o artificiales, permanentes o temporales, lénticos o lóticos, dulces, salobres o salados, incluyendo las extensiones marinas o arrecifes de coral o, en su ausencia, hasta seis metros de profundidad en marea baja.

Infiltración: La infiltración es el volumen de agua procedente de las precipitaciones que atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros del suelo y del subsuelo.

Intensidad de lluvia: Es la cantidad de agua caída por unidad de tiempo. Ejemplo cantidad en milímetros por hora “mm/hr”.

Lago: Masa permanente de agua depositada en hondonadas del terreno.

Léntico: Dícese de un hábitat de agua dulce caracterizado por aguas en calma o quietas.

Lótico: Característica de un hábitat de agua dulce fluyente.

Naciente: afloramiento superficial de agua de origen subterráneo que se produce a favor de grietas o cambios de litología en lugares donde la superficie topográfica corta al nivel freático o se captan mediante labores practicadas al efecto. Conocido como manantial, nacimiento, urgencia, ojo de agua, lloradera, venero.

Obra en cauce: Estructura civil que se realiza en un cauce de dominio público con el fin de mejorar las condiciones deterioradas de este. Para este documento se refiere si para la toma se requiere construir obra civil, ya sea parcial (que no cierra totalmente el cauce) o según el rango de altura de la presa.

Perforación del subsuelo: Se refiere al uso de maquinaria especializada para realizar un hoyo con fines de exploración de las aguas subterráneas para su explotación. El método usado depende de algunos factores como: diámetro del pozo, profundidad del pozo y formaciones geológicas a ser penetradas, así se pueden clasificar como métodos de percusión y rotativos.

Período de retorno de una: Intervalo de tiempo dentro del cual un evento considerado como máxima o mínimo puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio.

Permiso: Instrumento o figura jurídica por medio de la cual en forma precaria se autoriza la implementación de obras hidráulicas en los cauces.

Pozo: Hoyo o pique, generalmente vertical, excavado en tierra para explorar y extraer aguas subterráneas hacia la superficie.

Pozo artesanal: Excavación del terreno realizada a pico y pala de gran diámetro y poca profundidad (máxima 20-30 metros) con el fin de extraer aguas subterráneas hacia la superficie. Y que conforme la Ley de Agua No. 276 no requiere de concesión para su aprovechamiento cuando su destino sea el doméstico.

Pozo profundo: Pozo de más de 20 metros de profundidad y con un diámetro que fluctúa entre las 0.10 y 0.50 metros.

Predio Inferior: Se denomina predio inferior al terreno ubicado aguas abajo de un punto de toma a ambos lados de la ribera de la corriente hasta que ésta se junte con otra corriente.

Quebrada: Curso de agua permanente o intermitente que corre por las quebradas de las sierras o en tierra llana. Cualquier agua que corre de una barranca a un río. Abertura estrecha y áspera entre montañas. Valle relativamente estrecho entre dos cordones de montañas.

Represamiento: Almacenamiento artificial o natural de agua en el terreno o dentro de un cauce. Obra construida para retener el flujo de agua de un río dentro de un tramo determinado de su cauce o para prevenir inundaciones debidas a mareas u ondas.

Riego: Práctica mediante la cual se satisface la demanda hídrica a los cultivos en condiciones de estrés, de modo que la producción sea óptima. Existen varios métodos de riego:

- **Riego por aspersión:** Se trata de satisfacer el déficit de agua de un cultivo a través de una simulación de lluvia.
- **Riego por goteo:** El agua se aplica directamente en la base de la planta a una tasa baja, de este modo se reducen las pérdidas de evaporación y de arrastre por el viento.
- **Riego por gravedad de tipo inundación:** Se subdivide en riego por pozas que se utiliza en zonas planas rodeadas por diques de tierra, acumulando el agua en las pozas hasta que se infiltre en su totalidad y el riego por bordos, basado en la construcción de franjas utilizando diques de tierra con una pendiente uniforme.
- **Riego por gravedad de tipo surcos:** Se adapta a los cultivos desarrollados en surcos, confinándose el agua en los canales.

Río: Sistema Hidrográfico que conduce aguas producto de la precipitación y de la recarga subsuperficial en forma de flujo permanente o intermitente. Corriente de agua de grandes dimensiones que drena una cuenca de forma natural.

Sistema de tratamiento: Conjunto de procesos físicos, químicos o biológicos, cuya finalidad es mejorar la calidad del agua a descarga a un cuerpo de agua, conforme el reglamento de vertidos.

Tiempo de concentración: Tiempo transcurrido desde que una gota de agua cae en el punto más alejado de la cuenca hasta que llega a la salida de ésta. Este tiempo está en función de ciertas características geográficas y topográficas de la cuenca

Tipo de Cauce: Nivel del río según una clasificación aceptada, la más sencilla se refiere a si se trata de un afluente o al cauce principal del río. Incluir el orden hidrológico en escala 1:50000.

Ubicación: Se refiere al sitio de solicitud de concesión, si es en la cuenca alta, media o baja. Más detalladamente con coordenadas y altitud sobre el nivel del mar. (Según sistema aceptado en cada

país, por ejemplo en Costa Rica se utiliza el sistema transversal de Mercator, CRTM05 del 2005) preferible utilizar un SIG.

Uso: Finalidad del aprovechamiento del agua, se clasifican según el siguiente detalle:

- Acuicultura.
- Agroindustrial: Aprovechamiento del agua en agro procesos.
- Agropecuario: Aprovechamiento del agua en la crianza, producción y aprovechamiento de animales
- Comercial: Agua destinada al envasado y comercialización.
- Consumo Humano: Suministro de agua para satisfacer las necesidades de un núcleo familiar o particular.
- Fuerza Hidráulica: Agua destinada al aprovechamiento en el desarrollo de energía mecánica, o bien para producir electricidad
- Industrial: Agua destinada a la utilización de empresas cuyo fin es el uso como insumo de su producto final o utilizada como parte del proceso.
- Riego: Aprovechamiento de agua para la producción de cultivos.
- Turístico: Agua destinada al aprovechamiento por empresas destinadas a ofrecer un servicio privado temporal de hotelería, recreación, restaurante, etc.

Zona de recarga acuífera: Área a que alimenta un acuífero, bien por infiltración directa, o por escorrentía e infiltración subsiguiente.

Zona de reserva hidráulica: Área geofísica delimitada para destinar el aprovechamiento del recurso hídrico al desarrollo de la fuerza hidráulica en generación eléctrica, bajo norma legal expresa y en condiciones restringidas para otros usos.

Zona de reserva hídrica: Área geofísica delimitada para destinar el aprovechamiento del recurso hídrico a un uso determinado y fines específicos, establecido bajo norma legal expresa y en condiciones de restricción.

7 Referencias bibliográficas

Agualimpia Y, Castro C. (2006). Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. Tecnogestión No1, Vol3. Colombia

Arthington, A, H. and J.M. Zalucki. (1998). Comparative evaluation of environmental Flow assessment techniques: review of methods. Land and Water Resources Research & Development Corporation.

Carvajal Y, Castro L, Monsalve E. (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental Ingeniería y Universidad. No2, Vol10. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia Recuperado de: <http://www.redalyc.org/html/477/47710203/>

Castro L. 2006. Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. Revistas científicas Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/html/477/47710203/>

Gordon N, T McMahon, B Finlayson, Gippel C, Nathan R. (1992). Stream Hydrology. An Introduction for Ecologists. John Wiley & Sons, Chi Chester.

Hoppe, R. (1975). Minimum stream flows for fish. Paper distributed at Soils - Hydrology Workshop. USFS, Montana State University. Bozeman, Montana.

King L. (1996). Intraspecific phytogeography of *Iasmigona subviridis* (Bivalvia: Unionidae): conservation implications of range discontinuity. Kearneysville, West Virginia.

King J.M, Brown C.A. & Sabet H. (2003). A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for regulated rivers. Rivers: Research and Application.

Krasovskaia I, Rodríguez C. (2007). Determinación de una metodología para establecer el caudal de compensación en los ríos de Costa Rica a partir de los casos de estudio. Instituto Costarricense de Electricidad. Costa Rica.

Krasovskaia I, et al. (2014). Caudal de Compensación, Fase 2. Determinación del caudal adaptativo. San José, Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad

Loar, J, M Sale. (1981). Analysis of environmental issues related to small-scale hydroelectric development: In stream flow needs for fishery resources. Oak Ridge National laboratory, Environmental Science Division, Oak Ridge, TN.

Lytle D, Poff. (2004). Adaptation to natural Flow regimes. *TRENDS in Ecology and Evolution*. No2.Vol10, p 94-100.

Palau A, Alcazar J. (1996). The basic flow: An alternative approach to calculate minimum environmental in stream flows. *Ecohydroulique* 2000

Pantoja N. (2017). Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos, hidráulicos y ecológicos en la quebrada El Conejo (Mocoa- Putumayo). Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá Colombia.

Pouilly, M. y Aguilera, G. (2012). Evaluación Inicial de Caudales Ecológicos/Ambientales en la cuenca del río Huasco – Chile, mediante la simulación del hábitat físico del pejerrey *Basilichthys microlepidotus* y el camarón de río *Cryphiops caementarius*. UICN, Quito, Ecuador

Reiser D, Wesche W, Estes C. (1989). Status of in stream flow legislation and practices In North America

Swales S, Bishop K A, Harris JH. (1994). Assessment of environmental flows for native fish in the Murray-Darling Basin– a comparison of methods. Australian Water and Wastewater Association Inc.: Artarmon, NSW, Australia.

Tennant D. (1976). In stream flow requirements for fish, wildlife, recreation, and environmental resources. Proc. Symposium on In stream Flow Needs. Editors: Osborn J. and Alman C. Bethesda. USA. pp. 359-373.

Tharme, R. (1996). Review of International Methodologies for the Quantification of the In stream Flow Requirements of Rivers. Water Law Review Final Report for Policy Development for the Department of Water Affairs and Forestry. Pretoria.

Tharme R, King, J. (1998). Development of the Building Block Methodology for in stream flow assessments, and supporting research on the effects of different magnitude flows on riverine ecosystems. Water Research Commission Report.

Thompson A. (1992). Water Allocation for the Environment- the Canadian Experience. Proceedings of an International Seminar and Workshop on Water Allocation for the Environment. The Centre for Water Policy Research, University of New England. Armidale, Australia. 282 pp.

UNESCO (Organización de la Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) (2017) Toolkit para Caudales Ambientales. Recuperado de: <https://es.unesco.org/node/275904>

Wesche T, A Richard. (1980). A Summary of In stream Flow Methods for Fisheries and Related Needs. Eisenhower Consortium Bulletin No. 9. Produced by the Water Resources Research Institute, University of Wyoming, for the USDA Service.

White R, Cochnauer T. (1975). Stream Resource Maintenance Flow Studies. Idaho Department of Water Resources. Idaho Department of Fish and Game, and Idaho Cooperative Fishery Unit. Boise Idaho.

Informe de Gira

Indicadores Biológicos de Caudal en la Subcuenca del Río Birrís

M.Sc. Alejandro Muñoz Rivera
Biólogo

Abril 2017

Instituto Tecnológico de Costa Rica

EFFECTOS DEL CAUDAL SOBRE LAS COMUNIDADES DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS

Las disminuciones en el flujo de agua en un ambiente lótico por lo general causan una disminución de la velocidad del agua, de la profundidad de la misma y del ancho del cuerpo de agua. Además, esta situación conlleva efectos como el aumento de la sedimentación y cambios en el régimen térmico y la química del agua. La abundancia de invertebrados acuáticos puede aumentar o disminuir en respuesta a la disminución del flujo, según las necesidades de cada especie, pero la riqueza general de invertebrados por lo general disminuye debido a que la diversidad de hábitats del sitio en cuestión disminuye (Dewson *et al.* 2007).

Los invertebrados difieren en sus tolerancias y requerimientos ambientales, y cualquier pérdida de área de hábitat o alteración de los recursos alimenticios por la disminución del flujo de agua puede influir en el comportamiento del organismo y en las interacciones bióticas en las que toma parte. La deriva de invertebrados a menudo aumenta inmediatamente después de la reducción del flujo, aunque algunos taxones son más sensibles a los cambios en el flujo que otros. Los flujos bajos naturales y los flujos artificialmente reducidos tienen efectos similares en los invertebrados, pero la gravedad (duración y magnitud) de la disminución del flujo puede influir en las respuestas de los invertebrados. Algunos taxones de invertebrados son especialmente sensibles a las disminuciones de caudal y pueden ser indicadores útiles de la reducción de los caudales o de la restauración del flujo de agua en un sitio (Dewson *et al.* 2007).

El efecto de la disminución del caudal en los cuerpos de agua es un tema importante, pero se han realizado pocos estudios empíricos de los impactos de la disminución del flujo en los ecosistemas lóticos, y se necesitan más experimentos que manipulen estas variables para comprender las consecuencias ecológicas de la disminución del caudal (Dewson *et al.* 2007).

La investigación europea, especialmente la británica, tiene una larga historia en el tema del biomonitoreo, y uno de los temas que se han estudiado es el impacto de los caudales bajos en los ensamblajes de especies de los ecosistemas lóticos (Extence *et al.* 1999). En lugares con estudios de monitoreo de largo plazo, se ha documentado que muchos invertebrados acuáticos presentan requerimientos precisos con respecto a ámbitos de caudal o velocidades de corriente particulares, y que ciertos taxones pueden ser indicadores ideales de las condiciones de caudal prevalentes en un sistema (Extence *et al.* 1999).

Incluso en los países con una larga tradición de biomonitoreo acuático, ha habido relativamente pocos intentos de establecer enlaces directos entre los cambios observados en las comunidades de invertebrados acuáticos y las permutaciones en los regímenes hidrológicos (Extence *et al.* 1999). La variabilidad espacio-temporal del caudal de los ríos es un control fundamental de la estructura del hábitat y de la integridad de los ecosistemas ribereños. Sin embargo, son raras las series temporales ecológicas a largo plazo para probar hipótesis acerca de las interacciones hidrología-ecología en un contexto temporal más amplio, y los estudios que abarcan múltiples ríos son a menudo limitados en su cobertura temporal a menos de cinco años (Monk *et al.* 2008).

Ninguno de los sistemas que se conocen en la actualidad, sin embargo, ha sido capaz de proveer un método integral de evaluación del efecto en las fluctuaciones de caudal sobre los seres vivos que habitan los ambientes lóticos. Extence y sus colaboradores comenzaron a establecer el índice LIFE (Lotic-Invertebrate Index for Flow Evaluation o Índice de Evaluación de Flujo basado en Invertebrados Lóticos) en los años noventa. Este índice se construyó a partir de bases de datos de diversos ríos a lo largo de toda Gran Bretaña, las cuales contenían varios años de información. Con base en los resultados observados en estos estudios, construyeron un sistema de categorización de los tipos de caudal a los cuales se asocian diferentes especies o familias de invertebrados, para lograr describir y predecir el impacto de las variaciones en caudal sobre los mismos.

Monk y colaboradores (2008) tomaron ventaja de la investigación de Extence y colaboradores (1999) y realizaron un análisis hidroecológico integral en términos espacio-temporales de las respuestas ecológicas a largo plazo (1990-2000) a la variabilidad del régimen de flujo de agua de los ríos en 83 sitios a lo largo de Inglaterra y Gales. Los principales resultados de este estudio demuestran claramente que existen tres "regiones" asociadas con las características del régimen de flujo. Esto quiere decir que diferentes tipos de ríos, según su origen geológico, los materiales que componen

sus lechos y definen su química, y los regímenes de flujo que presentan a lo largo del año, difieren entre sí y presentan dinámicas ecológicas específicas.

Estos investigadores evidencian que las grandes sequías están asociadas con una disminución gradual del índice LIFE cuando baja el caudal de los cuerpos de agua, en comparación con los períodos de “normalidad” que se presentan antes de tales eventos. También indican que es evidente la respuesta de las comunidades de invertebrados a los regímenes de flujo de alta magnitud. Estos resultados demuestran que la clasificación de ríos en regiones de régimen de flujo ofrece una manera de ayudar a desentrañar asociaciones hidroecológicas complejas. El enfoque adoptado en este documento podría adaptarse fácilmente a otras ubicaciones geográficas en las cuales se disponga de conjuntos de datos. Este trabajo es imprescindible para comprender las interacciones entre el régimen de flujo y la ecología a largo plazo en un contexto espacial más amplio y así evaluar futuras respuestas hidroecológicas al cambio climático y la modificación antropogénica de los ecosistemas ribereños.

Este tipo de sistema de información se ha construido a partir de información detallada y colectada a lo largo de muchos años, y una de sus principales fortalezas es que identifica el tipo de caudal preferido por diferentes especies de invertebrados acuáticos. En nuestro país no podemos todavía llegar a un nivel tan detallado de resolución, ya que para la mayoría de grupos solo podemos identificar los invertebrados acuáticos a nivel de género (Springer 2008).

Extence y colaboradores (1999) indican que el flujo de agua en un río se puede estudiar de diferentes maneras y se puede expresar en múltiples maneras también, y las comunidades de invertebrados que colonizan diferentes tipos de ríos responderán a muchas diferentes características del régimen de flujo del cuerpo de agua. Es muy importante tener en cuenta también que las dinámicas de flujo de agua que afectan la estructura de una comunidad varían espacial y temporalmente a lo largo de todo sitio de estudio, por lo que las inferencias que se pueden desprender de un estudio en particular deben ser analizadas cuidadosamente y no se pueden atribuir a un solo aspecto del ecosistema, como lo es el caudal del cuerpo de agua.

METODOLOGÍA

Para realizar la recolecta de especímenes se siguieron las especificaciones detalladas por Ramírez (2010) y estipuladas en el Reglamento Nacional para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (MINAE-S 2007).

Los puntos de muestreo coinciden con los lugares en los que se han colocado equipos para medir caudal de los ríos utilizados en el estudio, y seleccionados por el equipo de trabajo del ITCR.

En cada uno de estos puntos se estableció un transecto paralelo al flujo de agua del cuerpo de agua de 50 m de distancia, y se procedió a recolectar macroinvertebrados acuáticos con la ayuda de un colador de mano de plástico y pinzas entomológicas.

También se realizaron recolectas directas, ya que estas son importantes para poder obtener aquellos organismos que se encuentran fuertemente adheridos al sustrato, como las larvas de lepidópteros y tricópteros (Ramírez 2010).

En cada sitio se realizaron muestreos equivalentes a una hora-hombre de trabajo.

Los organismos se recogieron con los coladores y fueron preservados inmediatamente en alcohol al 80%.

Los organismos recolectados fueron posteriormente identificados a nivel de orden, familia y género. Algunos de los organismos no pudieron ser identificados a nivel de género debido a algunas de las siguientes razones:

- No habían alcanzado el nivel de desarrollo necesario para reconocer las características taxonómicas apropiadas.
- Sufrieron daños mecánicos en el proceso de captura y transporte y perdieron una o varias estructuras anatómicas importantes clave.

- El grupo taxonómico al que pertenecen (por lo general la Familia) no es bien conocido y no se cuenta con la literatura y claves taxonómicas necesarias para realizar una identificación apropiada de los géneros presentes en el país.

Los sitios de Capelladas, Puente Río Birrís y Puente Río Pacayas fueron muestreados durante la mañana del martes 28 de marzo de 2017. El sitio Central JASEC fue muestreado durante la mañana del martes 11 de abril de 2017.

RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación se encuentran organizados según su localización natural en la microcuenca del Río Birrís, comenzando con el sitio más cercano a la naciente del mismo y finalizando con el que se encuentra más cerca de la unión con el río Reventazón.

SITIO: CAPELLADES

Este sitio presenta características que lo hacen un lugar potencialmente muy diverso en invertebrados acuáticos. El río exhibe una buena mezcla de microhábitats, entre los que se encuentran los siguientes:

- Rápidos pedregosos en el medio del cauce
- Pozas calmadas en las orillas de la ribera
- Bancos arenosos a la orilla de la ribera
- Secciones de flujo de agua con una velocidad moderada
- Vegetación creciendo a lo largo de las orillas
- Ramas de árboles que se introducen en el cauce
- Poza profunda
- Catarata
- Hojarasca atrapada entre las rocas grandes presentes en el cauce
- Acumulaciones de materia orgánica en trechos de poca corriente, como pedazos grandes de madera, ramitas, hojarasca, flores y frutos flotantes

A pesar de esta alta variedad de posible hábitats, la diversidad de macroinvertebrados acuáticos que se encontró no fue alta, ni estuvo particularmente representada por organismos típicos de aguas limpias (Cuadro 1).

Cuadro 1. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Capellades.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Coleoptera (Escarabajos)		
Familia Dytiscidae	1	4
Género indeterminado	1	-
Orden Diptera (Moscas y Mosquitos)		
Familia Chironomidae	40	2
<i>Chironomus</i>	17	-
Género indeterminado	23	-
Familia Empididae	1	4
Género indeterminado	1	1
Familia Simuliidae	273	4
<i>Simulium</i>	273	-
Familia Tabanidae	1	4
Género indeterminado	1	-
Familia Tipulidae	3	4
<i>Tipula</i>	3	-
Orden Ephemeroptera (Efímeras)		

Familia Baetidae	1	5
<i>Moribaetis</i>	1	-
Orden Trichoptera (Frigáneas)		
Familia Leptoceridae	1	8
<i>Oecetis</i>	1	-
Orden Amphipoda (Crustáceos Anfípodos)		
Familia Hyalellidae	3	7
<i>Hyalella</i>	3	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: "Aguas de calidad mala, contaminadas"	42	

La mayoría de los organismos recolectados corresponde a larvas de moscas y mosquitos (Orden Diptera). De los 324 especímenes recolectados en total, 318 pertenecen a este grupo, lo que representa un 98,1%.

De los dípteros totales, 273 especímenes corresponden a individuos del género *Simulium*, pertenecientes a la familia Simuliidae y conocidos generalmente como "bocones" en el país. El género *Simulium* fue el más abundante en la muestra, y representa un 84.3% de todos los especímenes recolectados.

El segundo grupo más abundante en este sitio corresponde a los mosquitos quironómidos de la familia Chironomidae. En total se encontraron 40 representantes de esta familia, correspondientes a un 12,3% de los especímenes de la muestra.

Tanto los simúlidos como los quironómidos presentan adaptaciones que les permiten sobrevivir en aguas bastante contaminadas (Roldán 1988, Merritt *et al.* 2008). Las larvas de los simúlidos se alimentan por medio de dos juegos de pelos filtradores que presentan a ambos lados de la cabeza (Figura 1). Ya que estos organismos filtran materia orgánica correspondiente a partículas finas presentes en el agua, mayores cargas de sedimentos pueden favorecer el crecimiento de sus poblaciones (Thorp & Covich 2001). Muchos de los otros organismos acuáticos son afectados por el incremento en la carga de partículas finas del agua, ya que estas pueden llegar a acumularse en sus branquias, disminuyendo o impidiendo la obtención de oxígeno a partir del agua (Thorp & Covich 2001).

El aumento en las cargas de sedimentos, por lo tanto, implican una ventaja doble para la larvas de los simúlidos. En primer lugar, una mayor disponibilidad de alimentos, y en segundo lugar una disminución de sus posibles depredadores y competidores en el ecosistema.

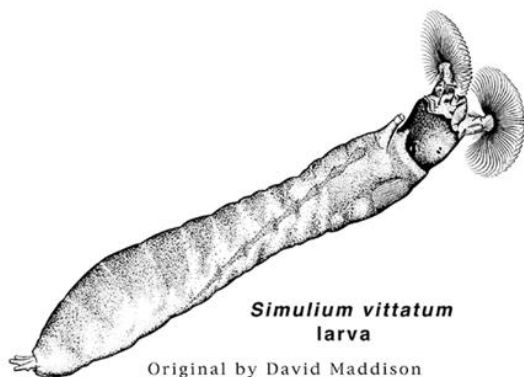


Figura 1. Ejemplo de la anatomía de la larva de un mosquito del género *Simulium*.

Las larvas de los quironómidos encontradas en esta muestra proceden de los bancos arenosos presentes en la orilla del río. Varias especies de esta familia, y en especial el género *Chironomus*, presentan adaptaciones para sobrevivir en estos ambientes en los cuales el oxígeno es escaso, debido al aumento de la temperatura del agua, la falta de flujo de la misma, y la acción de microorganismos que descomponen materia orgánica y consumen el oxígeno disponible, como las

bacterias (Roldán 1988, Merritt *et al.* 2008). Es por esto que cuando los cuerpos de agua se contaminan, estos organismos se hacen prevalentes, ya que son muy resistentes a la contaminación por materia orgánica, que promueve la disminución del oxígeno disponible debido a la descomposición bacteriana. El género *Chironomus*, por ejemplo, ha desarrollado pigmentos similares a la hemoglobina de los mamíferos, lo que le permite aprovechar más eficientemente el oxígeno del agua, y resistir ambientes con bajas concentraciones de este gas (Thorp & Covich 2001, Figura 2).



Figura 2. Ejemplo de la anatomía de la larva de un mosquito del género *Chironomus*.

Además de presentar respuestas cualitativas a los cambios en el caudal, los estudios que se han realizado en sitios específicos han revelado que la mayoría de los taxones asociados con flujos lentos de agua aumentan cuantitativamente a medida que el caudal disminuye, y lo contrario es cierto para aquellos taxones que se asocian con flujos rápidos de agua (Extence *et al.* 1999). Las alteraciones en la estructura de los ensamblajes de especies ocurren, por lo tanto, como una consecuencia directa de los patrones variables de caudal, o indirectamente a través de los cambios en los hábitats que ocurren debido a este fenómeno (Dewson *et al.* 2007).

Los demás dípteros encontrados, así como los escarabajos (Orden Coleoptera, Familia Dytiscidae) y las efímeras (Orden Ephemeroptera, Familia Baetidae, corresponden a grupos que son bastante resistentes a la contaminación, y por lo tanto bastante comunes en los ríos y quebradas en general.

Dos de los grupos encontrados tienen menor resistencia a la contaminación y son más típicos ríos y quebradas limpios: las frigáneas de la familia Leptoceridae (Orden Trichoptera) y los crustáceos de la familia Hyalellidae (Orden Amphipoda). Estos organismos por lo general requieren mayores contenidos de oxígeno, aguas de flujo más rápido y que presenten menores temperaturas.

De los organismos encontrados, ninguno puede clasificarse con seguridad como un indicador de caudal en el río. Los organismos que se encuentran más ligados a esta variable tienden a encontrarse debajo o alrededor de las rocas en medio del cauce, donde el agua se mueve causando más turbidez y donde típicamente se forman rápidos (Thorp & Covich 2001). Existen grupos específicos que se encuentran en este microhábitat, y varios de ellos son los que presentan de las mayores calificaciones en el índice BMWP-CR, lo que quiere decir que son sensibles a la contaminación y que necesitan vivir en ambientes bien oxigenados (MINAE-S 2007). Sin embargo, y a pesar del aparente buen estado del río y de la idoneidad del sitio debido a la diversidad de microhábitats disponibles y la baja temperatura del agua, no se encontraron representantes de estos grupos. Los hábitats donde se esperaba encontrar organismos indicadores de caudal en el río estaban dominados por larvas de simúlidos.

El agua no presentaba una apariencia turbia, por lo que en campo no se detectó una contaminación evidente por sedimentos. Este resultado atípico, y contrario a las predicciones sobre la fauna presente que se pueden hacer a partir de una caracterización visual del sitio de muestreo, podría indicar perturbaciones ambientales causadas por el uso de agroquímicos que hayan contaminado las aguas del río.

Otra posibilidad es que al igual que los otros sitios de muestreo, el sitio de Capellades haya sido afectado por un flujo de agua intenso o extraordinario, que haya eliminado la fauna presente anteriormente. En este caso, lo que se observa en

el sitio de muestreo es la recolonización de los diferentes microhábitats disponibles por parte de la fauna acuática, y los grupos presentes, que son resistentes a la contaminación y condiciones ambientales difíciles para otros invertebrados, han sido los organismos pioneros que han podido acaparar los espacios y recursos disponibles.

SITIO: PUENTE, RÍO BIRRÍS

Este sitio corresponde a una sección del río más contaminada que la anterior, debido a la carga de aguas residuales aportadas al cauce a lo largo del paso del cuerpo de agua por tierras de cultivo y zonas habitadas. La porción del río seleccionada para realizar el muestreo presentó micro hábitats principalmente correspondientes a secciones de flujo de agua con una velocidad moderada, sobre un sustrato pedregoso somero y aguas someras, y vegetación creciendo a lo largo de las orillas.

La diversidad de macro invertebrados acuáticos que se encontró fue similar a la del sitio de Capellades, y la calidad de agua según el índice BMWP-CR resultó ser la misma, “aguas de calidad mala, contaminadas”, superando por un solo punto el resultado del sitio anterior (Cuadro 2).

Cuadro 2. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Puente-Río Birrís.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Coleoptera (Escarabajos)		
Familia Hydrophilidae	2	3
Género indeterminado	2	-
Orden Diptera (Moscas y Mosquitos)		
Familia Chironomidae	5	2
<i>Chironomus</i>	3	-
Género indeterminado	2	-
Familia Simuliidae	52	4
<i>Simulium</i>	52	-
Orden Ephemeroptera (Efímeras)		
Familia Baetidae	74	5
<i>Baetodes</i>	48	-
<i>Camelobaetidius</i>	4	-
Género indeterminado	22	-
Orden Hemiptera (Chinches)		
Familia Veliidae	5	0
<i>Rhagovelia</i>	5	-
Orden Odonata (Libélulas)		
Familia Calopterygidae	1	4
<i>Hetaerina</i>	1	-
Familia Coenagrionidae	1	4
<i>Argia</i>	1	-
Orden Trichoptera (Frigáneas)		
Familia Hydropsychidae	2	5
<i>Leptonema</i>	2	-
Orden Amphipoda (Crustáceos anfípodos)		
Familia Hyalellidae	2	7
<i>Hyalella</i>	2	-
Orden Isopoda (Crustáceos isópodos/Chanchitos)		
Familia Asellidae	1	3
Género indeterminado	1	-
Clase Hirudinea (Sanguijuelas)		

Familia Glossiphoniidae	1	3
<i>Helobdella</i>	1	-
Clase Gastropoda (Caracoles)		
Familia Physidae	13	3
Género indeterminado	13	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: "Aguas de calidad mala, contaminadas"	43	

En este sitio, la mayoría de los organismos recolectados corresponde a larvas de efímeras (Orden Ephemeroptera) de la familia Baetidae (46,5% de los individuos), seguidos por larvas de bocones del género *Simulium* (32,7% de los individuos.)

En este sitio se observó una mayor riqueza de grupos de invertebrados, como larvas escarabajos de la familia Hydrophilidae, chinches patinadores del género *Rhagovelia*, libélulas del género *Hetaerina*, y frigáneas del género *Leptonema*. En este sitio se encontraron además anélidos (sanguijuelas de la familia Glosiphoniidae) y moluscos (caracoles de la familia Physidae). Es importante notar que la mayoría de estos grupos estuvo representada solo por unos cuantos individuos.

Todos los organismos observados, excepto los anfípodos del género *Hyaella*, corresponden a grupos bastante resistentes a la contaminación, y es común encontrarlos en cuerpos de agua tanto prístinos como alterados. Por su capacidad de tolerar niveles de moderados a altos de contaminación, tienden a ser los grupos dominantes en cuerpos de agua contaminados (Merritt *et al.* 2008).

La presencia de caracoles, especialmente en un número relativamente alto, como en este caso, por lo general se encuentra asociada con un aumento en la contaminación del agua, en especial el arrastre de sedimentos (Thorp & Covich 2001, Merritt *et al.* 2008).

La frigánea *Leptonema* corresponde a uno de los organismos con potencial para utilizarse como indicador del nivel de caudal de un cuerpo de agua (Figura 3). Estos organismos por lo general se encuentran en las zonas de rápidos de los cuerpos de agua, entre las rocas de mayor tamaño. En este ambiente construyen una red filtradora a partir de un material similar a la seda (Figura 4). El material particulado que queda adherido a esta red sirve como alimento a las larvas, y muchas veces incluye microalgas verdes, que proporcionan esta coloración al abdomen de estas frigáneas, mientras las algas pasan por su sistema digestivo (Roldán 1988, Springer 2010).



Figura 3. Larva de *Leptonema* sp.

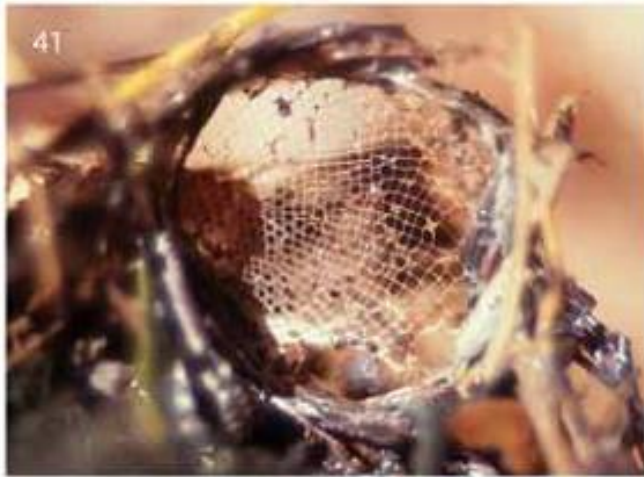


Figura 4. Red filtradora de *Leptonema*. Fuente: Springer 2010.

En términos generales, este sitio posee un abaja riqueza de macroinvertebrados acuáticos, y un bajo número de individuos registrados.

SITIO: PUENTE, RÍO PACAYAS

Este sitio también se caracterizó por un alto nivel de alteración. La porción del río seleccionada para realizar el muestreo presentó micro hábitats principalmente correspondientes a secciones de flujo de agua con una velocidad moderada, sobre un sustrato pedregoso somero y aguas someras principalmente, así como vegetación creciendo a lo largo de las orillas.

Este sitio resultó ser el más pobre en términos de la diversidad de macroinvertebrados acuáticos, con solo 8 géneros incluidos en 4 familias diferentes. Debido a esta baja diversidad de la calidad de agua según el índice BMWP-CR resultó ser “mala, muy contaminada” (Cuadro 3).

Cuadro 3. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Puente-Río Pacayas.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Diptera (Moscas y Mosquitos)		
Familia Chironomidae	25	2
<i>Rheotanytarsus</i>	1	-
Género indeterminado	24	-
Familia Simuliidae	64	4
<i>Simulium</i>	64	
Orden Ephemeroptera (Efímeras)		
Familia Baetidae	42	5
<i>Baetodes</i>	16	-
<i>Camelobaetidius</i>	14	-
Género indeterminado	12	-
Orden Trichoptera (Frigáneas)		
Familia Hydropsychidae	3	5
<i>Leptonema</i>	3	-
Clase Gastropoda (Caracoles)		
Familia Lymnaeidae	5	3
Género indeterminado	5	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR:		19

“Mala, muy contaminada”

En este sitio el grupo dominante fueron los bocones del género *Simulium* (46,0% de los individuos), seguido de efímeras de la familia Baetidae (30,2% de los individuos), y quironómidos (17,9% de los individuos).

Todos los especímenes encontrados corresponden a organismos resistentes a la contaminación, y esta mezcla de grupos y el bajo número de individuos (139 en total), indican la baja calidad biológica de este sitio, y los efectos de la contaminación probablemente proveniente de aguas negras y/o servidas, plaguicidas y fertilizantes provenientes de actividades agropecuarias y sedimentos que llegan a los cuerpos de agua producto de la erosión.

Aparte del género *Leptonema*, ninguno de los organismos encontrados en este sitio podría utilizarse como indicador de caudal.

SITIO: CENTRAL JASEC

En este sitio los muestreos se llevaron a cabo principalmente en ambientes rocosos con agua de poca profundidad. Se encontraron secciones con flujo rápido de agua y acumulación de rocas grandes, así como paquetes sumergidos de materia orgánica como hojarasca y ramitas. El flujo de agua en el punto seleccionado, sin embargo, fue bastante lento, debido al bajo nivel de agua que presenta el río en este punto al momento de realizar el muestreo.

Este sitio presentó el mayor nivel de diversidad de invertebrados acuáticos. Las efímeras de la familia Leptohiphidae resultaron ser el grupo dominante, representando el 64,0% de los 150 individuos recolectados.

Este sitio, a diferencia de los demás, presentó números más bajos de moscas y mosquitos, y en contraste, se registró la presencia de escarabajos de las familias Elmidae y Limnichidae; chinches patinadores de la familia Veliidae, polillas de la familia Crambidae; larvas de libélulas de la familia Libellulidae y frigáneas de la familia Hydropsychidae (Cuadro 4).

Cuadro 4. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Central JASEC.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Coleoptera (Escarabajos)		
Familia Elmidae	2	5
Género indeterminado	2	-
Familia Limnichidae	1	5
Género indeterminado	1	-
Orden Diptera (Moscas y Mosquitos)		
Familia Chironomidae	8	2
<i>Chironomus</i>	1	-
<i>Rheotanytarsus</i>	3	-
Género indeterminado	4	-
Familia Simuliidae	3	4
<i>Simulium</i>	3	-
Orden Ephemeroptera (Efímeras)		
Familia Baetidae	14	5
<i>Baetodes</i>	1	-
<i>Camelobaetidius</i>	1	-
Género indeterminado	12	-
Familia Leptohiphidae	96	5
<i>Leptohiphes</i>	1	-
<i>Tricorythodes</i>	95	-
Familia Leptophlebiidae	1	8
<i>Farrodes</i>	1	-

Orden Hemiptera (Chinches)		
Familia Veliidae	8	0
<i>Microvelia</i>	2	-
<i>Rhagovelia</i>	6	-
Orden Lepidoptera (Mariposas y Polillas)		
Familia Crambidae	1	5
<i>Petrophila</i>	1	-
Orden Odonata (Libélulas)		
Familia Libellulidae	4	6
<i>Brechmorhoga</i>	1	-
Género indeterminado	3	-
Orden Trichoptera (Frigáneas)		
Familia Hydrobiosidae	4	9
<i>Atopsyche</i>	4	-
Familia Hydropsychidae	4	5
<i>Leptonema</i>	3	-
<i>Smicridea</i>	1	-
Clase Gastropoda (Caracoles)		
Familia Physidae	4	3
Género indeterminado	4	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: "Aguas de calidad regular, con eutrofia, contaminación moderada"	62	

Es de especial notoriedad la presencia de la frigánea del género *Atopsyche*, el cual se considera bastante sensible a la contaminación y tiende a encontrarse en aguas prístinas (Roldán 1988, MINAE-S 2007, Springer 2010).

Debido a esta diversidad relativamente más alta de taxones, este sitio es el que presenta el mayor nivel de calidad de agua de todos los muestreados a lo largo de esta microcuenca, y obtiene una calificación de "regular, con eutrofia, contaminación moderada" (Cuadro 4).

Este resultado llama la atención debido a que siendo este el punto de muestreo ubicado en la parte más baja de la microcuenca, se ve expuesto a la acumulación de efectos negativos que afectan a los cuerpos de agua que se encuentran aguas arriba. Estos efectos, como se ha mencionado anteriormente, incluyen la contaminación por aguas negras y grises, la contaminación química debido al uso agropecuario de fertilizantes y plaguicidas y el arrastre de sedimentos debido a la erosión. A estos efectos hay que agregar la alteración del flujo normal de agua debido a la represa y el desvío de los cuerpos de agua naturales para acomodar la infraestructura necesaria para la producción de electricidad alrededor de la casa de máquinas.

A pesar de que la calidad de agua en este punto es solo "regular", el hecho de que el agua utilizada se reincorpora al río Reventazón en este lugar permite que los cuerpos de agua presentes se vean expuestos a un ambiente relativamente menos alterado, lo cual promueve la recolonización de los hábitats disponible por parte de los diferentes grupos de macroinvertebrados (Thorp & Covich 2001).

Es importante notar que el flujo de agua para el momento de la colecta de especímenes era lento, a pesar de ser esta una sección de río en la que se espera un flujo de agua de velocidad moderada a rápida.

CONCLUSIONES

Para este primer muestreo realizado en abril, y correspondiente a la transición entre la estación seca y la estación lluviosa, ninguno de los cuatro sitios de muestreo analizados presentaron organismos que puedan ser utilizados como indicadores de caudal.

Los organismos que se utilizan como indicadores de caudal corresponden a representantes de los órdenes Megaloptera y Plecoptera. Los perros de agua (Orden Megaloptera, Familia Corydalidae), corresponden a uno de los principales grupos de depredadores entre los insectos acuáticos, y en ambientes de poco caudal, como riachuelos, se consideran depredadores tope de las cadenas alimenticias de invertebrados acuáticos (Thorp & Covich 2001). Las moscas de las piedras (Orden Plecoptera, Familia Perlidae), corresponden a uno de los grupos con los mayores requerimientos de oxígeno, y se consideran entre los insectos acuáticos más sensibles a la contaminación orgánica y la disminución en el flujo de agua (Thorp & Covich 2001, Merritt *et al.* 2008, Gutiérrez-Fonseca 2010).

La ausencia de estos organismos, sin embargo, no puede ser atribuida solamente a los cambios en el caudal sufridos por los cuerpos de agua examinados. Como se mencionó anteriormente, las moscas de las piedras son organismos muy sensibles a los cambios fisicoquímicos del agua, y pueden desaparecer debido a disminuciones en el oxígeno disuelto en los cuerpos de agua causados por la entrada de sedimentos, por ejemplo, y no solo por el cambio en el flujo de agua o la elevación de la temperatura que acompaña este cambio físico del cambio del volumen de agua (Thorp & Covich 2001, Merritt *et al.* 2008). Tanto estos organismos, como las efímeras (Orden Ephemeroptera) pueden sufrir cambios en sus poblaciones debido a variaciones ambientales de este tipo, y estas fluctuaciones se hacen evidentes en las poblaciones de sus depredadores a medida que los efectos se trasladan a través de las cadenas tróficas (Thorp & Covich 2001, Flowers & De la Rosa 2010). Los perros de agua se encuentran entre los depredadores de estos grupos, y sus poblaciones pueden reducirse o desaparecer debido a estos cambios ecológicos, y no solo a fluctuaciones marcadas en el caudal del cuerpo de agua.

La disminución o desaparición de las poblaciones de estos grupos indicadores, además, puede deberse a los efectos de la introducción de sustancias tóxicas a los ambientes lóticos, como lo son los plaguicidas utilizados en las actividades agropecuarias. Los cambios ecológicos causados por otras sustancias, como los fertilizantes, pueden diezmar los niveles de oxígeno presentes en el agua debido a fenómenos como la eutrofización (Merritt *et al.* 2008). Cuando se utilizan organismos como bioindicadores, no se puede perder de vista que los efectos que se cuantifican en las poblaciones corresponden a la sinergia entre muchos factores ambientales, los cuales solo pueden dilucidarse individualmente mediante la aplicación de experimentos cuidadosamente diseñados (Extence *et al.* 1999).

RECOMENDACIONES

La principal recomendación para completar el conocimiento de la dinámica de la subcuenca del Río Birrís corresponde a recolectar información acerca de los organismos presentes en los cuerpos de agua a través del período de tiempo que le resta al proyecto. La continuación de la recolección de información sobre los invertebrados acuáticos presentes en estos sitios de muestreo revelará cambios en la riqueza de taxones y los números relativos de los diferentes grupos a lo largo del resto del año, lo que brindará información que se puede correlacionar con los cambios en el caudal registrado en los cuerpos de agua.

Cuando se realicen estudios en otras cuencas, con condiciones geológicas, topográficas y ecológicas distintas, es de vital importancia arrancar con un esquema de biomonitorio que permita ligar las mediciones de caudal y otras características físicas o fisicoquímicas del cuerpo de agua con los organismos presentes a lo largo del año en los cuerpos de agua.

Como se evidencia en los estudios de Extence y colaboradores (1999), Dewson y colaboradores (2007) y Monk y colaboradores (2008), es de suma importancia establecer redes nacionales de recolección de información a largo plazo, para poder contar con la masa crítica de datos necesaria para poder establecer relaciones válidas entre los fenómenos naturales que afectan los cuerpos de agua. Es con datos confiables y que abarquen el mayor período continuo de tiempo

posible, que se podrán interpretar estos fenómenos y se podrán hacer predicciones realistas sobre el comportamiento de los caudales y sus consecuencias sobre las poblaciones humanas y los ecosistemas.

REFERENCIAS

- Dewson, Z.S., A.B. James, R.G. Death. 2007. A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society* 26(3):401-415.
- Extence, C.A., D.M. Balbi & R.P. Chadd. 1999. River flow indexing using British benthic macroinvertebrates: a framework for setting hydroecological objectives. *Regulated Rivers: Research and Management*. 15:543–574.
- Flowers, R.W. & C. De la Rosa. 2010. Ephemeroptera. *Rev.Biol.Trop.* 58(4): 63-93.
- Gutiérrez-Fonseca, P. 2010. Plecoptera. *Rev.Biol.Trop.* 58(4): 139-148.
- Merritt, R.W., K.W. Cummins & M.B. Berg. 2008. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Kendall/Hunt Publishing Company. Dubuque, Estados Unidos. 1159 p.
- MINAE-S. 2007. Reglamento Nacional para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales. Decreto, No. 33903, La Gaceta No. 178. San José, Costa Rica.
- Monk, W. A., P.J. Wood, D.M. Hannah & D.A. Wilson. 2008. Macroinvertebrate community response to inter-annual and regional river flow regime dynamics. *River Res. Applic.* 24:988–1001.
- Ramírez, A. 2010. Métodos de Recolección. *Rev.Biol.Trop.* 58(4): 41-50.
- Roldán, G. 1988. Guía para el estudio de los invertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia. Antioquia, Colombia. 218 p.
- Springer, M. 2008 Aquatic insect diversity of Costa Rica: state of knowledge. *Rev. Biol. Trop.* 56(4):273-295.
- Springer, M. 2010. Trichoptera. *Rev.Biol.Trop.* 58(4): 151-198.
- Thorp, J. & A.P. Covich. 2001. *Ecology and classification of North American Freshwater Invertebrates*. Academic Press. Nueva York, Estados Unidos. 1056 p.

Informe de Gira

Indicadores Biológicos de Caudal en la Subcuenca del Río Birrís

M.Sc. Alejandro Muñoz Rivera
Biólogo

Octubre 2017

Instituto Tecnológico de Costa Rica

CONSIDERACIONES SOBRE LA RELACIÓN DEL CAUDAL DE LOS ECOSISTEMAS LÓTICOS Y LAS COMUNIDADES DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS

Un factor muy importante a considerar dentro de la temática del manejo de cuerpos de agua con el fin de proveer de recurso hídrico a las actividades agropecuarias por medio del riego, a las actividades de producción de energía hidroeléctrica y a la población humana en forma de agua para consumo, es el del flujo ecológico que se debe respetar para asegurar el acceso al agua a todos los habitantes de una cuenca. El otro factor a tomar en cuenta es la necesidad de mantener niveles de agua adecuados para que los procesos naturales que ocurren en los ecosistemas acuáticos puedan continuar ocurriendo. El concepto de “caudal ecológico” incluye aspectos como la cantidad, uso en el tiempo, duración, frecuencia y calidad de los caudales requeridos para sostener los ecosistemas acuáticos, estuarinos y costeros que dependen del agua, así como el bienestar de las poblaciones humanas. Para asegurar la permanencia en el tiempo de las comunidades biológicas acuáticas, así como la integridad de los servicios ecosistémicos que proveen los sistemas lóticos, es necesario asegurar regímenes hídricos ecológicamente apropiados (Acreman & Ferguson 2010).

Las tendencias políticas actuales exigen que las herramientas de biomonitoreo, y de monitoreo en términos generales, sean efectivas a grandes escalas. Esto incluye el hecho de que los patrones de referencia a gran escala de las comunidades naturales deberían ser relativamente estables (Statzner & Abeche 2010). En muchos lugares esta es una condición difícil de cumplir, ya que la integridad natural de los cuerpos de agua ha sido comprometida y ha sufrido modificaciones secuenciales a lo largo del tiempo, como es el caso de la subcuenca del río Birrís.

Conociendo esta problemática, es importante también tomar en cuenta que las fluctuaciones en el volumen de los cuerpos de agua, ya sea por causas naturales o artificiales, tienen efectos en las comunidades de invertebrados acuáticos, y que su gravedad (duración y magnitud) dependerá no solo de estas variables físicas, sino de los impactos que hayan sufrido estas comunidades en otros aspectos, como lo son los cambios poblacionales y a nivel de ensamblaje de especies debido a contaminación, introducción de especies exóticas o cambios antropogénicos en el paisaje (Dewson *et al.* 2007).

En muchos ecosistemas, los efectos de las actividades agropecuarias, que contribuyen sustancias como fertilizantes y plaguicidas, son los principales factores asociados con la afectación de las comunidades biológicas y los servicios ecosistémicos. Las repercusiones de estos efectos se extienden a lo largo de las comunidades de algas, invertebrados y vertebrados, y se ha constatado que las poblaciones de todos estos tipos de organismos disminuyen a medida que aumenta la intensidad de las actividades agropecuarias. Para la mayoría de organismos pequeños, entre ellos las algas y los invertebrados, se ha reportado un comportamiento tipo umbral, en el cual se da un decline precipitado de las poblaciones a niveles relativamente bajos de contaminación, y posteriormente, niveles bajos de respuesta a medida que aumenta el nivel de contaminación (Cuffney *et al.* 2000). Este comportamiento describe la fragilidad de los ecosistemas lóticos, los cuales sufren cambios significativos al enfrentar condiciones de estrés relativamente menores, y luego alcanzan un nuevo nivel de equilibrio que implica una comunidad de organismos seriamente disminuida y conformada por organismos resistentes a la contaminación.

Esta es justamente la dinámica que se describe en el presente informe para los sitios de muestreo escogidos a lo largo de la subcuenca del río Birrís, en la cual no ha sido posible, en los dos muestreos realizados hasta la fecha, encontrar poblaciones y comunidades adecuadas de invertebrados que puedan servir como indicadores de las variaciones en el caudal de los cuerpos de agua estudiados.

METODOLOGÍA

Para realizar la recolecta de especímenes se siguieron las especificaciones detalladas por Ramírez (2010) y estipuladas en el Reglamento Nacional para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (MINAE-S 2007).

Los puntos de muestreo coinciden con los lugares en los que se han colocado equipos para medir caudal de los ríos utilizados en el estudio, y seleccionados por el equipo de trabajo del ITCR.

En cada uno de estos puntos se estableció un transecto paralelo al flujo de agua del cuerpo de agua de 50 m de distancia, y se procedió a recolectar macroinvertebrados acuáticos con la ayuda de un colador de mano de plástico y pinzas entomológicas.

También se realizaron recolectas directas, ya que estas son importantes para poder obtener aquellos organismos que se encuentran fuertemente adheridos al sustrato, como las larvas de lepidópteros y tricópteros (Ramírez 2010).

En cada sitio se realizaron muestreos equivalentes a una hora-hombre de trabajo.

Los organismos se recogieron con los coladores y fueron preservados inmediatamente en alcohol al 80%.

Los organismos recolectados fueron posteriormente identificados a nivel de orden, familia y género. Algunos de los organismos no pudieron ser identificados a nivel de género debido a algunas de las siguientes razones:

- No habían alcanzado el nivel de desarrollo necesario para reconocer las características taxonómicas apropiadas.
- Sufrieron daños mecánicos en el proceso de captura y transporte y perdieron una o varias estructuras anatómicas importantes clave.
- El grupo taxonómico al que pertenecen (por lo general la Familia) no es bien conocido y no se cuenta con la literatura y claves taxonómicas necesarias para realizar una identificación apropiada de los géneros presentes en el país (Springer 2008).

Los muestreos de todos los sitios se realizaron durante la mañana del martes 18 de julio de 2017.

RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación se encuentran organizados según su localización natural en la microcuenca del Río Birrís, comenzando con el sitio más cercano a la naciente del mismo y finalizando con el que se encuentra más cerca de la unión con el río Reventazón.

SITIO: CAPELLADES

Durante este segundo muestreo, el sitio presentó características muy similares a las observadas en el primer muestreo realizado en marzo. No se notó un cambio significativo en los diferentes microhábitats presentes, y de nuevo se reporta una alta diversidad de ambientes favorables para la presencia de invertebrados acuáticos, entre los que se encuentran:

- Rápidos pedregosos en el medio del cauce
- Pozas calmadas en las orillas de la ribera
- Bancos arenosos a la orilla de la ribera
- Secciones de flujo de agua con una velocidad moderada
- Vegetación creciendo a lo largo de las orillas
- Ramas de árboles que se introducen en el cauce
- Poza profunda con catarata pequeña
- Hojarasca atrapada entre las rocas grandes presentes en el cauce
- Acumulaciones de materia orgánica en trechos de poca corriente, como pedazos grandes de madera, ramitas, hojarasca, flores y frutos flotantes

Además de la conformación física del sitio de muestreo y su diversidad de microhábitats, otras características del sitio lo hacen ideal como hábitat para invertebrados acuáticos. El agua presentó durante ambos muestreos una temperatura por debajo de los 20°C, lo cual favorece un alto contenido de oxígeno disuelto. La sección del río escogida como sitio de

muestreo presenta además un alto nivel de corriente, lo que evita el estancamiento y promueve la oxigenación mecánica del agua. A pesar de todos estos factores favorables, la diversidad de macroinvertebrados acuáticos que se encontró fue la más baja de los cuatro sitios muestreados (Cuadro 1).

Cuadro 1. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Capellades.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Amphipoda (Crustáceos Anfípodos)		
Familia Hyalellidae	1	7
<i>Hyalella</i>	1	-
Clase Oligochaeta (Lombrices)		
Familia Tubificidae	2	1
<i>Tubifex</i>	2	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: "Muy mala, extremadamente contaminadas"		8

Con respecto al primer muestreo, este sitio bajó dos niveles de calidad en el índice BMWP-CR. En marzo la calidad del agua resultó ser "mala, contaminada", con una puntuación de 42. En esta ocasión el agua resultó ser "muy mala, extremadamente contaminada".

Es muy importante recalcar que la ausencia de organismos en este sitio es una situación anómala a la que hay que poner atención. A pesar del muestreo realizado de manera estandarizada, solo fue posible registrar la presencia de tres individuos. Los anfípodos del género *Hyalella* (Fig. 1), viven entre la materia vegetal en descomposición de los cuerpos de agua, y se alimentan de algas filamentosas y diatomeas, además de bacterias (Smith 2001). Típicamente los organismos de este género son especies indicadoras de buena calidad de agua, especialmente porque se encuentran asociados a ambientes de aguas frías, pero algunas especies han demostrado un amplio ámbito de tolerancia a diferentes ambientes, e incluso estos organismos se encuentran en muchos de los ríos del Valle de Orosi, los cuales presentan regímenes de temperaturas muy diferentes a los del sitio de muestreo. Por esta razón no se puede asignar un carácter de indicador a este grupo, debido además a que no se ha trabajado la taxonomía del grupo a nivel de especie en Costa Rica.



Figura 1. Anfípodo del género *Hyalella*

El otro tipo de organismo encontrado corresponde a lombrices del género *Tubifex* (Fig. 2), los cuales viven en los sedimentos de los cuerpos de agua. Al estar adaptados a este tipo de ambientes de bajo contenido de oxígeno, suelen ser muy resistentes y están presentes en grandes cantidades en cuerpos de agua en los que otros organismos ya no pueden sobrevivir, ya que se liberan los recursos disponibles debido a la ausencia de competidores. A pesar de no haber

encontrado otros organismos en el cuerpo de agua, es notable que se hayan encontrado tan pocos individuos de *Tubifex* en el sitio.



Figura 2. Lombriz del género *Tubifex*

Al igual que en el primer muestreo, el agua no presentó evidencia de alto contenido de sedimentos, sino que más bien tuvo un aspecto cristalino y no se visibilizó acumulación de sedimentos en el lecho del río.

Debido a la evidencia concordante en los dos muestreos realizados hasta la fecha, es importante considerar la posibilidad de que esta sección del cuerpo de agua esté sufriendo los efectos de una contaminación química de origen agrícola, ya que la ausencia casi completa de macroinvertebrados acuáticos en un sitio con condiciones tan favorables es sospechosa e incluso alarmante.

Debido a estos resultados, no es posible utilizar este sitio con el propósito de evaluar la posible relación entre los organismos presentes y el caudal del cuerpo de agua. Los anfípodos del género *Hyalella* no se consideran típicamente como organismos asociados a zonas de corriente, y si se lograran capturar en mayores cantidades en los muestreos podría verificarse si existe alguna correlación entre su presencia y el nivel de caudal del río.

SITIO: PUENTE, RÍO BIRRÍS

Este sitio corresponde a una sección del río más contaminada que la anterior, debido a la carga de aguas residuales aportadas al cauce a lo largo del paso del cuerpo de agua por tierras de cultivo y zonas habitadas. En este sitio se notó en ambas ocasiones la presencia de desechos como bolsas plásticas, envolturas de alimentos y pedazos de plástico de tipo PVC, así como una carga mayor de sedimentos que la observada en el sitio de Capellades.

La porción del río seleccionada para realizar el muestreo presentó micro hábitats principalmente correspondientes a secciones de flujo de agua con una velocidad moderada, sobre un sustrato pedregoso somero y aguas someras, y vegetación creciendo a lo largo de las orillas. El agua tuvo un aspecto transparente y un olor que reveló la presencia de materia orgánica en estado de descomposición.

La diversidad de macro invertebrados acuáticos que se encontró fue mayor a la del sitio de Capellades, y la calidad de agua según el índice BMWP-CR resultó ser, “aguas de calidad mala, contaminadas” (Cuadro 2).

Cuadro 2. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Puente-Río Birrís.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Coleoptera (Escarabajos)		
Familia Hydrophilidae	1	3

Género indeterminado	1	-
Orden Diptera (Moscas y Mosquitos)		
Familia Simuliidae	2	4
<i>Simulium</i>	2	-
Orden Ephemeroptera (Efímeras)		
Familia Baetidae	2	5
<i>Baetodes</i>	1	-
Género indeterminado	1	-
Familia Leptohyphidae	3	5
<i>Tricorythodes</i>	3	-
Orden Trichoptera (Frigáneas)		
Familia Hydropsychidae	4	5
<i>Leptonema</i>	4	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: "Aguas de calidad mala, muy contaminadas"	22	

Con respecto al muestreo anterior, este sitio bajó una categoría de calidad (en marzo presentó aguas de calidad "mala, contaminadas", y la puntuación del índice BMWP-CR se redujo casi a la mitad.

Al igual que en el sitio anterior, se redujo no solo la diversidad de diferentes grupos taxonómicos registrados, sino también la cantidad de individuos. En este sitio se capturaron solo 12 individuos, pertenecientes todos a familias reconocidas por su tolerancia a niveles de contaminación de moderados a altos.

Todos los géneros de invertebrados acuáticos encontrados en esta ocasión fueron encontrados en el muestreo anterior, con la única excepción del género *Tricorythodes*, una efímera de la familia Leptohyphidae (Fig. 3). Este organismo se encuentra en un amplio ámbito de diferentes ambientes y se considera tolerante a la contaminación (Flowers & De la Rosa 2010). Los demás organismos observados se clasifican como grupos resistentes a la contaminación y corresponden a la fauna típica que logra sobrevivir en ambientes contaminados y con niveles disminuidos de oxígeno en el agua (Merritt *et al.* 2008).



Figura 3. Efímera del género *Tricorythodes*

A pesar de ser un sitio que ofrece microhábitats en los cuales se favorece un flujo de agua de velocidad moderada, o se registró la presencia de ningún organismo típicamente asociado a estas condiciones ambientales, y por ende, afectado directamente por los cambios en el caudal del cuerpo de agua. Es notable la ausencia de la frigánea *Leptonema*, la cual se encuentra asociada a este tipo de ambientes (Springer 2010) y la cual fue registrada en el muestreo anterior.

Al igual que en el muestreo anterior, este sitio posee una baja riqueza de macroinvertebrados acuáticos, y un bajo número de individuos registrados, y esta tendencia continuó y aumentó en el segundo muestreo.

SITIO: PUENTE, RÍO PACAYAS

Este sitio corresponde a un ambiente muy alterado y no ofrece una alta diversidad de microhábitats para los invertebrados acuáticos. La porción del río seleccionada para realizar el muestreo presentó secciones de flujo de agua con una velocidad moderada, sobre un sustrato pedregoso somero y aguas someras principalmente, así como vegetación creciendo a lo largo de las orillas. Este sitio es bastante homogéneo en términos de microhábitats, por lo que no corresponde a un ambiente que se espera presente una alta diversidad de organismos.

Este sitio resultó ser el segundo más pobre en términos de la diversidad de macroinvertebrados acuáticos, con solo 3 géneros incluidos en 3 familias. Debido a esta baja diversidad de la calidad de agua según el índice BMWP-CR resultó ser “mala, muy contaminada” (Cuadro 3).

Cuadro 3. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Puente-Río Pacayas.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Diptera (Moscas y Mosquitos)		
Familia Chironomidae	1	2
<i>Chironomus</i>	1	-
Familia Simuliidae	2	4
<i>Simulium</i>	2	
Clase Hirudinea (Sanguijuelas)		
Familia Erpobdellidae	1	3
Género indeterminado	1	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: “Muy mala, extremadamente contaminada”		11

Al igual que en los otros sitios, la cantidad de organismos registrados resultó ser sumamente baja. Las familias encontradas fueron representadas solo por uno o dos individuos.

Con respecto al muestreo anterior, la riqueza de familias encontradas disminuyó de un total de 5 para marzo a un total de tres para julio. En el primer muestreo se observó la presencia de bocones del género *Simulium* y quironómidos, al igual que en esta ocasión. El único grupo nuevo encontrado en este muestreo corresponde a la sanguijuela de la familia Erpobdellidae (Fig. 4).



Figura 4. Sanguijuela de la familia Erpobdellidae

Las sanguijuelas, en términos generales, son organismos bastante resistentes a la contaminación y no es raro encontrarlos entre los invertebrados acuáticos presentes en sitios contaminados (Thorp & Covich 2001). La familia Erpobdellidae específicamente, pertenece a una línea evolutiva que ha abandonado los hábitos parasíticos típicos de las sanguijuelas, y los diferentes miembros de la familia son más bien depredadores de invertebrados acuáticos (Siddall 2002).

Ninguno de los organismos encontrados en este sitio podría utilizarse como indicador de caudal, ya que todos se asocian principalmente a ambientes de aguas estancadas o dependen de los sedimentos que se acumulan en el fondo de los cuerpos de agua (Roldán 1998).

SITIO: CENTRAL JASEC

Este sitio presentó niveles bajos de agua y corrientes lentas. El ambiente presentó principalmente en ambientes rocosos con agua de poca profundidad. Se encontraron secciones con flujo moderado de agua y acumulación de rocas grandes, así como algunos paquetes sumergidos de materia orgánica como hojarasca y ramitas.

Con respecto al primer muestreo, este sitio bajó dos niveles de calidad en el índice BMWP-CR. En marzo la calidad del agua resultó ser “regular, con eutrofia, contaminación moderada”, con una puntuación de 62. En esta ocasión el agua resultó ser “mala, muy contaminada” (Cuadro 4).

Cuadro 4. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Central JASEC.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Coleoptera (Escarabajos)		
Familia Staphylinidae	4	4
Género indeterminado	4	-
Orden Diptera (Moscas y Mosquitos)		
Familia Simuliidae	2	4
<i>Simulium</i>	2	-
Orden Ephemeroptera (Efímeras)		
Familia Baetidae	1	5
<i>Baetodes</i>	1	-
Familia Hydropsychidae	1	5
<i>Leptonema</i>	1	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: “Calidad mala, muy contaminada”		18

Los grupos encontrados corresponden a organismos tolerantes a la contaminación y distribuidos a lo largo de todo el país. El único registro nuevo al comparar con el primer muestreo corresponde a los escarabajos de la familia Staphylinidae (Fig. 5).



Figura 5. Escarabajo de la familia Staphylinidae

Al igual que en los demás sitios de muestreo, se registró una disminución en la diversidad de taxones y en la cantidad de individuos registrados.

A excepción del género *Leptonema*, ninguno de los organismos encontrados en este sitio podría utilizarse como indicador de caudal. Es importante notar que durante los dos muestreos realizados el flujo de agua en este sitio ha resultado ser lento o moderado, lo que puede limitar la presencia de organismos que se asocian con microhábitats con alto contenido de oxígeno, promovido por el flujo continuo de agua.

COMPARACIÓN DE SITIOS Y MUESTREOS

La tendencia más notoria encontrada en los cuatro sitios de muestreo durante el segundo muestreo es la disminución en el número de taxones registrados, así como en el número de individuos (Cuadro 5). Esta disminución en la diversidad de invertebrados acuáticos va de la mano con la disminución en la calidad del agua según el índice BMWP-CR.

Cuadro 5. Valores del índice BMWP-CR y total de individuos según sitio y muestreo.

Sitio	Primer Muestreo (Marzo)		Segundo Muestreo (Julio)	
	BMWP-CR	Individuos Totales	BMWP-CR	Individuos Totales
Capellades	42	324	8	3
Puente, Río Birrís	43	145	22	12
Puente, Río Pacayas	19	139	4	11
Central JASEC	62	150	18	8

Este tipo de resultado no es del todo extraño cuando se toma en cuenta la transformación de los ambientes lóticos a medida que se da el cambio de estaciones en nuestro país. El muestreo realizado en marzo presentó condiciones típicas de la estación seca, y es en esta época del año que se puede esperar una diversidad de macroinvertebrados acuáticos mayor en los cuerpos de agua. Esto se debe a que al haber menos volumen de agua entrando a los ríos, ocurre menos sedimentación y las aguas tienden a ser más cristalinas. Estas condiciones, sumadas a la disminución de la corriente, promueven ambientes más favorables para una mayor diversidad de invertebrados acuáticos (Roldán 1998).

A medida que las condiciones lluviosas aumentan, estas condiciones se revierten: la corriente aumenta, la escorrentía arrastra sedimentos y los sistemas lóticos se convierten en ambientes menos favorables para los invertebrados acuáticos. Algunos organismos, incluso, sincronizan sus ciclos de vida para tomar ventaja de las condiciones más favorables y evitar las condiciones menos convenientes (Thorp & Covich 2001). Por estas razones, una disminución de la diversidad de los invertebrados acuáticos a medida que ocurre la transición entre la estación seca y la estación lluviosa es un fenómeno cíclico que ocurre de manera natural.

La disminución drástica de individuos totales, y la disminución menos marcada de taxones totales registrados, sin embargo, debe ser un elemento que se debe tomar en consideración a la hora de sacar conclusiones con respecto al estado de las comunidades de invertebrados acuáticos de estos sitios. Ambos ríos muestreados reciben una carga importante de sedimentos, los cuales probablemente arrastran una carga considerable de plaguicidas y fertilizantes, producto de las actividades agrícolas que se dan en la zona. Estos efectos pueden exacerbar las diferencias naturales que se observan entre diferentes estaciones.

Estas alteraciones del funcionamiento normal de los ecosistemas lóticos estudiados, corresponden a una de las razones principales que puede afectar el uso de organismos indicadores de caudal. Estos organismos, además de estar asociados con microhábitats donde el flujo de agua es intenso, también son especialmente vulnerables a la contaminación, por lo que se pierden rápidamente de los ecosistemas una vez que se introduce un exceso de sedimentos, materia orgánica o contaminantes químicos (Gutiérrez-Fonseca 2010).

CONCLUSIONES

Ninguno de los cuatro sitios de muestreo analizados presentaron organismos que puedan ser utilizados como indicadores de caudal. Este resultado se reportó a su vez al momento de realizar el primer muestreo, y es de esperar que al avanzar la estación lluviosa ocurra una disminución en la calidad del agua al ser evaluada utilizando invertebrados acuáticos.

Las razones que explican esta disminución de la diversidad de organismos obedecen en gran parte a factores físicos de la dinámica de los ecosistemas lóticos, como lo es el aumento en la escorrentía y la el consecuente aumento de los niveles de turbidez y de contenido de materia orgánica del agua. Sin embargo, es muy importante recordar que así como aumenta el contenido de materiales naturales, como sedimentos, aumenta también la carga de contaminantes, en especial residuos orgánicos, sustancia químicas como fertilizantes, plaguicidas y antibióticos, así como desechos sólidos producto del inadecuado manejo de los residuos.

Todas estas variables actúan de manera sinérgica y definen la conformación de las comunidades de invertebrados acuáticos en un momento dado. Ya que la subcuenca del río Birrís corresponde a un conjunto de cuerpos lóticos altamente modificados debido al aprovechamiento de agua para riego, a la producción de energía hidroeléctrica y a la contaminación con desechos provenientes de los asentamientos humanos y las actividades agropecuarias, los cuerpos de agua analizados no han sido útiles para definir organismos indicadores de cambios en el caudal.

La fauna de invertebrados acuáticos de esta subcuenca se encuentra comprometida, especialmente en términos de aquellos organismos con el potencial para revelar información acerca de los cambios en el flujo de agua de los ríos, ya que por su biología resultan muy sensibles a otros cambios ambientales, como la disminución en la disponibilidad de oxígeno o la reducción de las poblaciones de sus presas.

Para lograr incorporar el componente de los organismos bioindicadores en proyectos que evalúan los cambios en el caudal de los ríos y quebradas es necesario realizar estudios en ríos que mantengan un nivel de alteración lo suficientemente bajo para poder encontrar los organismos clave que responden a esta variable.

RECOMENDACIONES

La evaluación final de los sitios de muestreo durante o después del pico de la estación lluviosa revelará si las tendencias acá indicadas se mantienen o si presentan alguna modificación interesante que pueda ayudar a comprender mejor la dinámica de estos ecosistemas.

De ser una opción plausible, se recomienda extender lo más posible el período de monitoreo de un futuro proyecto. Las variaciones cíclicas y las anomalías que experimentan los cuerpos de agua como respuesta a los cambios en las condiciones del tiempo son los eventos que proveen la información necesaria para desarrollar un criterio sobre la afectación y el posible comportamiento futuro de los cuerpos de agua del país.

REFERENCIAS

- Acreman, M.C. & J.D. Ferguson. 2010. Environmental flows and the European Water Framework Directive. *Freshwater Biology*. 55:32–48.
- Cuffney, T.F., M.R. Meador, S.D. Porter & M.E. Gurtz. 2000. Responses of Physical, Chemical, and Biological Indicators of Water Quality to a Gradient of Agricultural Land Use in the Yakima River Basin, Washington. *Environmental Monitoring and Assessment*. 64(1):259–270
- Dewson, Z.S., A.W. James & R.G. Death. 2007. A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*. 26(3):401-415.
- Flowers, R.W. & C. De la Rosa. 2010. Ephemeroptera. *Rev.Biol.Trop*. 58(4): 63-93.
- Gutiérrez-Fonseca, P. 2010. Plecoptera. *Rev.Biol.Trop*. 58(4): 139-148.
- Merritt, R.W., K.W. Cummins & M.B. Berg. 2008. An Introduction to the Aquatic Insects of North America. Kendall/Hunt Publishing Company. Dubuque, Estados Unidos. 1159 p.

- MINAE-S. 2007. Reglamento Nacional para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales. Decreto, No. 33903, La Gaceta No. 178. San José, Costa Rica.
- Ramírez, A. 2010. Métodos de Recolección. *Rev.Biol.Trop.* 58(4): 41-50.
- Roldán, G. 1988. Guía para el estudio de los invertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia. Antioquia, Colombia. 218 p.
- Siddall, M.E. 2002. Phylogeny of the leech family Erpobdellidae (Hirudinida : Oligochaeta). *Invertebrate Systematics.* 16: 1-6.
- Smith, D.G. 2001. Amphipoda. Pennak's freshwater invertebrates of the United States: Porifera to Crustacea. John Wiley. 1451 p.
- Springer, M. 2008 Aquatic insect diversity of Costa Rica: state of knowledge. *Rev. Biol. Trop.* 56(4):273-295.
- Springer, M. 2010. Trichoptera. *Rev.Biol.Trop.* 58(4): 151-198.
- Statzner, B. & L. Abeche. 2010. Can biological invertebrate traits resolve effects of multiple stressors on running water ecosystems? *Freshwater Biology.* 55(1):80-119.
- Thorp, J. & A.P. Covich. 2001. Ecology and classification of North American Freshwater Invertebrates. Academic Press. Nueva York, Estados Unidos. 1056 p.

Informe de Gira

Indicadores Biológicos de Caudal en la Subcuenca del Río Birrís

M.Sc. Alejandro Muñoz Rivera
Biólogo

Noviembre 2017

Instituto Tecnológico de Costa Rica

RECOMENDACIONES PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS

Como lo indica Diez-Hernández (2005), la alteración de la magnitud y frecuencia de los caudales extremos provocada por los cambios súbitos de caudal en los aprovechamientos hidroeléctricos resulta nociva para los ecosistemas lóticos, y entre los múltiples impactos que sufren estos ecosistemas se pueden citar: efectos letales para muchos organismos que son arrastrados durante los caudales máximos o quedan aislados en seco durante los caudales mínimos; favorecimiento de la instalación de especies generalistas que pueden desplazar a las especies nativas; desarrollo excesivo de algas; alteración o rompimiento del ciclo vital de algunas especies; y la modificación del sustrato del cuerpo de agua. Uno de los factores de mayor importancia es la modificación de la duración de estas irregularidades en el caudal, lo cual presenta efectos ecológicos comprobados. El alargamiento del período de caudales bajos limita el hábitat disponible e incrementa la concentración de los organismos acuáticos, reduce el refugio proporcionado por la cobertura vegetal y rompe la conexión entre el cauce y las márgenes. El alargamiento del período de inundación modifica la composición del bosque ribereño y reduce las zonas de rápidos para los peces.

El objetivo de establecer un régimen de caudal ambiental es el de emular la fenología primigenia de un cuerpo de agua mediante una serie temporal de caudales de escala y duración variable, diseñada en función de la adaptabilidad de la biocenosis a los cambios de caudal (Diez-Hernández y Ruiz 2007). Un régimen de caudal ambiental delimita el rango de condiciones hidráulicas capaces de asegurar la funcionalidad plena de una corriente en términos ambientales, económicos y sociales. Un caudal se considera ecológico si satisface las necesidades de abastecimiento humano y suministro agrícola e industrial, a expensas de un detrimento admisible del estado hidrobiológico del ecosistema del río y su ribera asociada en términos de integridad ecosistémica y estructural (Diez-Hernández 2005). Un régimen de caudales se define por cinco componentes que incluyen la magnitud, frecuencia, duración, predictibilidad y tasa de variación: la alteración de los valores naturales de cualquiera de ellos perturba el funcionamiento, la estructura o la composición del ecosistema fluvial. Por otra parte, no es raro que una corriente regulada se encuentre también contaminada, dos adversidades evitables cuyo efecto sinérgico menoscaba dramáticamente el estado ecológico del sistema fluvial (Diez-Hernández & Burbano 2006).

La aplicación de diferentes métodos para el cálculo de caudales ambientales o ecológicos conlleva un altísimo nivel de responsabilidad, y según Aguirre y De Bikuña (2001), en general en este proceso se ha incurrido en un error fundamental, puesto que la validación de los métodos propuestos se ha convertido, en muchos casos, en un ejercicio de retórica más o menos científica sobre la idoneidad del caudal propuesto y su suficiencia para garantizar la conservación del ecosistema; en vez de admitirlo como buen candidato y comprobar después si se satisfacen, uno por uno, los requerimientos ambientales propuestos. Estos investigadores definen el objetivo del caudal ecológico como “la preservación de la biodiversidad de un río; es decir, la conservación del patrimonio biológico del medio fluvial compatible con la satisfacción de las demandas sociales y sólo superado por el abastecimiento doméstico en el orden de prioridades”. En este sentido, metodologías basadas en la aplicación de un porcentaje del caudal medio de estiaje o del caudal medio interanual no son válidas si después no vienen acompañadas de criterios de vigilancia del grado de cumplimiento de ciertos requerimientos ambientales, como pueden ser, por ejemplo, procurar la conservación de determinadas especies o impedir la degradación de los hábitats fluviales. Además estos métodos no reproducen la variabilidad hidrológica natural.

Entre las metodologías recomendadas, Diez-Hernández y Ruiz (2007), quienes han trabajado en Colombia, indican que según su experiencia la metodología más acreditada y aplicada en el ámbito mundial para evaluar los requerimientos hídricos del ecosistema fluvial en un estudio de caudales ambientales es la denominada “Instream Flow Incremental Methodology” (IFIM, descrita por Bovee y Milhous, 1978). Estos investigadores opinan que esta metodología ha presentado una capacidad notable para modelar la ecohidráulica en los ríos de Colombia en los que se ha aplicado. En el estudio citado, los cálculos se establecen a partir de una caracterización fluvial que los investigadores consideran como “adecuada para los estudios normales de caudales ambientales locales, cuyo balance entre la precisión y el costo se encuentra optimizado”.

METODOLOGÍA

Para realizar la recolecta de especímenes se siguieron las especificaciones detalladas por Ramírez (2010) y estipuladas en el Reglamento Nacional para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (MINAE-S 2007).

Los puntos de muestreo coinciden con los lugares en los que se han colocado equipos para medir caudal de los ríos utilizados en el estudio, y seleccionados por el equipo de trabajo del ITCR.

En cada uno de estos puntos se estableció un transecto paralelo al flujo de agua del cuerpo de agua de 50 m de distancia, y se procedió a recolectar macroinvertebrados acuáticos con la ayuda de un colador de mano de plástico y pinzas entomológicas.

También se realizaron recolectas directas, ya que estas son importantes para poder obtener aquellos organismos que se encuentran fuertemente adheridos al sustrato, como las larvas de lepidópteros y tricópteros (Ramírez 2010).

En cada sitio se realizaron muestreos equivalentes a una hora-hombre de trabajo.

Los organismos se recogieron con los coladores y fueron preservados inmediatamente en alcohol al 80%.

Los organismos recolectados fueron posteriormente identificados a nivel de orden, familia y género. Algunos de los organismos no pudieron ser identificados a nivel de género debido a algunas de las siguientes razones:

- No habían alcanzado el nivel de desarrollo necesario para reconocer las características taxonómicas apropiadas.
- Sufrieron daños mecánicos en el proceso de captura y transporte y perdieron una o varias estructuras anatómicas importantes clave.
- El grupo taxonómico al que pertenecen (por lo general la Familia) no es bien conocido y no se cuenta con la literatura y claves taxonómicas necesarias para realizar una identificación apropiada de los géneros presentes en el país (Springer 2008).

Los muestreos de todos los sitios se realizaron durante la mañana del jueves 2 de noviembre de 2017.

RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación se encuentran organizados según su localización natural en la microcuenca del Río Birrís, comenzando con el sitio más cercano a la naciente del mismo y finalizando con el que se encuentra más cerca de la unión con el río Reventazón.

SITIO: CAPELLADES

El sitio presentó las mismas características reportadas para los dos muestreos anteriores. En este tercer muestreo no se notó un cambio significativo en los diferentes microhábitats presentes, y se reporta una vez más una alta diversidad de ambientes favorables para la presencia de invertebrados acuáticos, entre los que se encuentran los siguientes:

- Rápidos pedregosos en el medio del cauce
- Pozas calmadas en las orillas de la ribera
- Bancos arenosos a la orilla de la ribera
- Secciones de flujo de agua con una velocidad moderada
- Vegetación creciendo a lo largo de las orillas
- Ramas de árboles que se introducen en el cauce
- Poza profunda con catarata pequeña
- Hojarasca atrapada entre las rocas grandes presentes en el cauce

- Acumulaciones de materia orgánica en trechos de poca corriente, como pedazos grandes de madera, ramitas, hojarasca, flores y frutos flotantes

Durante los nueve meses que comprende el período de este estudio, el agua de este sitio presentó una temperatura por debajo de los 20°C, lo cual favorece un alto contenido de oxígeno disuelto, además de un alto nivel de corriente, lo que evita el estancamiento y promueve la oxigenación mecánica del agua, como se ha reportado anteriormente. A pesar de todos estos factores favorables, la diversidad de macroinvertebrados acuáticos que se encontró fue nula en este último muestreo (Cuadro 1). Debido a la ausencia de organismos acuáticos en este sitio, no se puede calcular la calidad de agua según el índice BMWP-CR.

Cuadro 1. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Capellades.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Clase Chilopoda (Ciempiés)		
Familia Indeterminada	1	-
Género indeterminado	1	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: No se puede evaluar		0

Se encontró un solo individuo, un ciempiés (Fig. 1), el cual no corresponde a un invertebrado de hábitos acuáticos, por lo menos entre las especies reportadas para Costa Rica. La Clase Chilopoda, el grupo taxonómico en que se agrupan los ciempiés, consta de organismos exclusivamente carnívoros, que habitan diversos tipos de ecosistemas, pero son más abundantes en la hojarasca de los bosques (Barnes 1982). Este grupo se compone exclusivamente de organismos terrestres, aunque recientemente se han reportado especies en el sureste de Asia que pueden nadar (Bates 2016). A pesar de estos reportes, ninguno de los integrantes de esta clase se considera como un organismo acuático, y la presencia de este espécimen en la muestra puede obedecer a una captura que se dio en las cercanías de la orilla del cuerpo de agua, o a un organismo que cayó al agua accidentalmente o llegó a ella después de morir.



Figura 1. Ciempiés de la Clase Chilopoda

En ninguno de los muestreos realizados en este sitio se encontró evidencia de evidencia de alto contenido de sedimentos, el agua presentó siempre un aspecto cristalino y no se visibilizó en ninguna ocasión acumulación de sedimentos en el lecho del río.

La ausencia de organismos acuáticos en un río con estas características es altamente irregular y es una situación que personalmente, este investigador nunca ha encontrado antes en ningún muestreo. Se sugiere reportar la situación a los usuarios de este cuerpo de agua, ya que podrían verse afectados por contaminación química, si es que esta es la razón que explica la ausencia de organismos. Como consideración final, el hecho de que no se encuentren organismos en este cuerpo de agua es un signo de que la fauna de macroinvertebrados acuáticos río abajo se puede estar viendo afectada

por las mismas razones que causan la ausencia de organismos en este sitio de muestreo. Además de los efectos altamente nocivos en la ecología de los cuerpos de agua de esta subcuenca, la ausencia de invertebrados acuáticos afecta la posibilidad de utilizar estos cuerpos de agua como modelos para el estudio de los organismos de este tipo en cálculos de caudales ambientales y fluctuaciones en los caudales de los cuerpos de agua.

SITIO: PUENTE, RÍO BIRRÍS

Este sitio se caracterizó a lo largo del estudio por estar afectado por alteraciones antropogénicas como la contaminación con residuos sólidos como plásticos y otros tipos de basura, desechos orgánicos que causan mal olor de las aguas, sedimentos y una baja diversidad de organismos acuáticos.

A lo largo del período de estudio, la porción del río seleccionada para realizar el muestreo presentó micro hábitats principalmente correspondientes a secciones de flujo de agua con una velocidad moderada, sobre un sustrato pedregoso somero y aguas someras, y vegetación creciendo a lo largo de las orillas. En este último muestreo el agua presentó una velocidad de flujo más elevada.

La diversidad de macro invertebrados acuáticos que se encontró fue la mayor de todos los sitios para este muestreo. Sin embargo, la calidad del agua según el índice BMWP-CR resultó ser, “aguas de calidad mala, muy contaminadas” (Cuadro 2).

Cuadro 2. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Puente-Río Birrís.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Diptera (Moscas y Mosquitos)		
Familia Chironomidae	80	2
<i>Chironomus</i>	41	-
Género indeterminado	39	-
Familia Simuliidae	3	4
<i>Simulium</i>	3	-
Orden Ephemeroptera (Efímeras)		
Familia Baetidae	4	5
<i>Camelobaetidius</i>	1	-
Género indeterminado	3	-
Familia Leptohyphidae	3	5
<i>Tricorythodes</i>	3	-
Orden Trichoptera (Frigáneas)		
Familia Hydropsychidae	1	5
<i>Leptonema</i>	1	-
Orden Amphipoda (Crustáceos Anfípodos)		
Familia Hyalellidae	1	7
<i>Hyalella</i>	1	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: “Mala, muy contaminada”		28

Con respecto al muestreo anterior, este sitio se mantuvo en la misma categoría de calidad (en marzo presentó aguas de calidad “mala, contaminadas”, y la puntuación del índice BMWP-CR aumentó en 6 puntos.

Al igual que en las ocasiones anteriores, casi todos los géneros de invertebrados acuáticos encontrados en este muestreo corresponden a grupos resistentes a la contaminación, y son ejemplares de la fauna típica que logra sobrevivir en ambientes contaminados y con niveles disminuidos de oxígeno en el agua (Merritt *et al.* 2008). La única excepción corresponde al anfípodo *Hyalella*, que se encuentra asociado a aguas frías y frecuentemente habita nacientes en zonas

montañosas, por lo que se le considera un organismo menos tolerante en términos generales (Smith 2001). Sin embargo, no es raro encontrarlo en ríos limpios de menor altitud, como en las microcuencas que drenan el Valle de Orosi, por ejemplo.

En este muestreo se volvió a encontrar la frigánea *Leptonema*, ausente en el muestreo anterior, la corresponde al único de los organismos registrados que se asocia a ambientes de corriente rápida (Springer 2010), y por lo tanto presenta una relativa sensibilidad a los cambios en la intensidad de la corriente.

SITIO: PUENTE, RÍO PACAYAS

En esta ocasión este sitio continuó exhibiendo características correspondientes a altos niveles de alteración. Este sitio no ofrece una alta diversidad de microhábitats para los invertebrados acuáticos y esto explica la bajísima diversidad de organismos encontrados (Cuadro 3). La porción del río seleccionada para realizar el muestreo presentó secciones de flujo de agua con una velocidad moderada sobre un sustrato pedregoso somero, además de aguas someras y vegetación creciendo a lo largo de las orillas, principalmente pastos. Además de estas características físicas, en el sitio se observaron residuos sólidos y contaminación por llegada de desechos orgánicos al agua.

A lo largo del período de estudio este sitio resultó ser uno de los más pobres en términos de la diversidad de macroinvertebrados acuáticos. Al igual que en el muestreo anterior, la calidad de agua según el índice BMWP-CR resultó ser “mala, muy contaminada”.

Cuadro 3. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Puente-Río Pacayas.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Diptera (Moscas y Mosquitos)		
Familia Simuliidae	2	4
<i>Simulium</i>	2	
Orden Ephemeroptera (Efímeras)		
Familia Baetidae	1	5
<i>Camelobaetidius</i>	1	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: “Muy mala, extremadamente contaminada”		9

Al igual que en el muestreo anterior, la cantidad de organismos registrados resultó ser sumamente baja. Las familias encontradas fueron representadas solo por uno o dos individuos. Ambos géneros encontrados en este sitio corresponden a organismos muy comunes en los cuerpos de agua lóticos y bastante resistentes a la contaminación (Roldán 1998, Thorp & Covich 2001, Flowers & C. De la Rosa 2010).

SITIO: CENTRAL JASEC

Este sitio, al igual que en el muestreo anterior, presentó niveles bajos de agua y corrientes lentas. El ambiente se caracterizó a lo largo de todo el período de estudio por presentar principalmente ambientes rocosos con agua de poca profundidad. Se encontraron secciones con flujo rápido y moderado de agua, así como acumulación de rocas de diversos tamaños y paquetes sumergidos de materia orgánica como hojarasca y ramitas. Estos ambientes promueven una mayor diversidad de organismos en los cuerpos de agua (Thorp & Covich 2001, Springer 2008).

Con respecto al muestreo anterior, este sitio se mantuvo en la misma categoría de calidad en el índice BMWP-CR, y el agua resultó ser “mala, muy contaminada” (Cuadro 4).

Cuadro 4. Individuos según taxón, valor BMWP-CR y clasificación de la calidad del agua del sitio de muestreo Central JASEC.

Taxón	Individuos	Valor BMWP
Orden Coleoptera (Escarabajos)		
Familia Limnichidae	1	5
Género indeterminado	1	-
Familia Staphylinidae	1	4
Género indeterminado	1	-
Orden Diptera (Moscas y Mosquitos)		
Familia Ephydriidae	2	2
Género indeterminado	2	-
Orden Trichoptera (Frigáneas)		
Familia Hydropsychidae	2	5
<i>Leptonema</i>	2	-
Categoría de Calidad de Agua según índice BMWP-CR: "Mala, muy contaminada"		16

Los grupos encontrados corresponden a organismos tolerantes a la contaminación y distribuidos a lo largo de todo el país, como por ejemplo los escarabajos de la familia Limnichidae (Fig. 2).



Figura 2. Escarabajo de la familia Limnichidae

De todos los sitios muestreados, este es el más prometedor en términos de su conformación física y flujo de agua. Sin embargo, nunca se encontró un ensamblaje de especies que permitiera clasificarlo como un sitio de alta calidad ecológica. Esto probablemente se debe a los impactos que tiene la regulación del flujo de agua debido a la captación de la JASEC para la producción de energía eléctrica (Dewson *et al.* 2007). Esta es una prueba del impacto ecológico que presentan las represas sobre los ensamblajes de especies que ven disminuido o alterado el caudal de los cuerpos de agua que necesitan para sobrevivir.

En el período en que se desarrolló este estudio solo se encontraron tres organismos con potencial como indicadores de alteraciones del flujo de agua, todas frigáneas: los géneros *Leptonema* y *Smicridea*, pertenecientes a la familia Hydropsychidae; y *Atopsyche*, perteneciente a la familia Hydrobiosidae. Las poblaciones de estos organismos resultaron ser bastante reducidas, lo que limita su utilidad a la hora de realizar estudios que permitan relacionar sus fluctuaciones demográficas con los cambios ecológicos producto de las fluctuaciones antropogénicas o naturales del caudal.

COMPARACIÓN DE SITIOS Y MUESTREOS

La tendencia más notoria encontrada en los cuatro sitios de muestreo durante el segundo muestreo es la disminución en el número de taxones registrados, así como en el número de individuos (Cuadro 5). Esta disminución en la diversidad de invertebrados acuáticos va de la mano con la disminución en la calidad del agua según el índice BMWP-CR.

Cuadro 5. Valores del índice BMWP-CR y total de individuos según sitio y muestreo.

Sitio	Primer Muestreo (Marzo)		Segundo Muestreo (Julio)		Tercer Muestreo (Noviembre)	
	BMWP-CR	Individuos Totales	BMWP-CR	Individuos Totales	BMWP-CR	Individuos Totales
Capellades	42	324	8	3	0	0
Puente, Río Birrís	43	145	22	12	28	89
Puente, Río Pacayas	19	139	4	11	9	3
Central JASEC	62	150	18	8	16	6

Como se puede observar en el Cuadro 5, la disminución en la cantidad de organismos y en la diversidad de géneros encontrados disminuye a medida que avanza la estación lluviosa. A medida que las condiciones lluviosas aumentan, aumentan también la corriente en los cuerpos de agua, la escorrentía, el contenido de sedimentos y la cantidad de materia orgánica disuelta (Thorp & Covich 2001), por lo que este patrón es de esperar en nuestros ecosistemas lóticos. Este año presentó precipitaciones intensas y prolongadas a lo largo de la estación lluviosa, en contraposición a los años anteriores que presentaron condiciones de sequía. El impacto de este incremento inusual en las precipitaciones puede haber contribuido a que la disminución de la cantidad y diversidad de invertebrados acuáticos fuera más marcada a lo largo de la estación lluviosa. Sin embargo, al ser este el primer estudio de este tipo que se lleva a cabo en los cuerpos de agua seleccionados, no se pueden hacer suposiciones robustas al respecto y se deben utilizar estos datos como una línea de base.

En los informes anteriores se indica la importancia de tomar en cuenta además la reducción de la fauna acuática debido a los efectos de las cargas de plaguicidas, fertilizantes y otras sustancias químicas asociadas con las actividades agropecuarias. La presencia de partículas microscópicas antibióticos y otros contaminantes emergentes son factores que vienen a hacer más complejo el perfil de contaminación de los cuerpos de agua y a promover la disminución de la biodiversidad de los sistemas lóticos y lénticos. Es importante considerar que las represas se convierten en reservorios de todas estas sustancias, y la liberación de sedimentos de las mismas exponen de manera exagerada a estos contaminantes a los ecosistemas y comunidades humanas que se encuentran río abajo de estas construcciones.

CONCLUSIONES

Ninguno de los cuatro sitios de muestreo analizados presentaron organismos que puedan ser utilizados como indicadores de caudal. Este resultado se reportó a su vez al momento de realizar el primer muestreo, y es de esperar que al avanzar la estación lluviosa ocurra una disminución en la calidad del agua al ser evaluada utilizando invertebrados acuáticos.

Las razones que explican esta disminución de la diversidad de organismos obedecen en gran parte a factores físicos de la dinámica de los ecosistemas lóticos, como lo es el aumento en la escorrentía y la el consecuente aumento de los niveles de turbidez y de contenido de materia orgánica del agua. Sin embargo, es muy importante recordar que así como aumenta el contenido de materiales naturales, como sedimentos, aumenta también la carga de contaminantes, en especial residuos orgánicos, sustancia químicas como fertilizantes, plaguicidas y antibióticos, así como desechos sólidos producto del inadecuado manejo de los residuos.

Todas estas variables actúan de manera sinérgica y definen la conformación de las comunidades de invertebrados acuáticos en un momento dado. Ya que la subcuenca del río Birrís corresponde a un conjunto de cuerpos lóticos altamente modificados debido al aprovechamiento de agua para riego, a la producción de energía hidroeléctrica y a la contaminación con desechos provenientes de los asentamientos humanos y las actividades agropecuarias, los cuerpos de agua analizados no han sido útiles para definir organismos indicadores de cambios en el caudal.

La fauna de invertebrados acuáticos de esta subcuenca se encuentra comprometida, especialmente en términos de aquellos organismos con el potencial para revelar información acerca de los cambios en el flujo de agua de los ríos, ya

que por su biología resultan muy sensibles a otros cambios ambientales, como la disminución en la disponibilidad de oxígeno o la reducción de las poblaciones de sus presas.

Para lograr incorporar el componente de los organismos bioindicadores en proyectos que evalúan los cambios en el caudal de los ríos y quebradas es necesario realizar estudios en cuerpos de agua que mantengan un nivel de alteración lo suficientemente bajo para poder encontrar poblaciones adecuadas de los organismos clave que responden a esta variable.

RECOMENDACIONES

Por las razones indicadas en la sección de Conclusiones, antes de escoger nuevos sitios de estudio en otras cuencas, es importante realizar estudios previos que incluyan un componente que describa de manera básica la demografía poblacional de los grupos más sensibles a los cambios en el caudal.

En ríos que desaguan volúmenes de agua mayores a los utilizados en estos estudios, y que se encuentren por debajo de los 2,400 m.s.n.m., se recomienda incluir muestreos de peces, que dependiendo del cuerpo de agua pueden dar una información más detallada acerca de las fluctuaciones en el caudal, los niveles de agua y los impactos que estas alteraciones ocasionan en las comunidades de organismos acuáticos.

REFERENCIAS

- Aguirre, A. & G. De Bikuña. 2001. Conceptos básicos para la aplicación del caudal ecológico en los ríos ibéricos. Anbiotek, País Vasco, España. 9 p.
- Barnes, R.D. 1982. Invertebrate Zoology. Holt-Saunders International. P. 810–816.
- Bates, M. 2016. 'Horrific' First Amphibious Centipede Discovered. National Geographic. Revisado el 16/11/2017. <https://news.nationalgeographic.com/2016/06/amphibious-centipede-discovered-laos-scolopendra-cataracta-new-species/>
- Bovee, K.D. y Milhous, R. T. 1978. Hydraulic simulation in instream flow studies. Instream Flow Information Paper No. 5. U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS78/33. Fort Collins (COEUEU).
- Dewson, Z.S., A.B. James, R.G. Death. 2007. A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates. Journal of the North American Benthological Society 26(3):401-415.
- Diez-Hernández, J.M. 2005. Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. Ingeniería y Competitividad. 7(2):11-18.
- Diez-Hernández, J.M. & L. Burbano. 2006. Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. Ingeniería e Investigación. 26(1):58-68.
- Diez-Hernández, J.M. & D.H. Ruiz. 2007. Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del río Palacé (Cauca). Gestión y Ambiente. 10(1):153-166.
- Flowers, R.W. & C. De la Rosa. 2010. Ephemeroptera. Rev.Biol.Trop. 58(4): 63-93.
- Merritt, R.W., K.W. Cummins & M.B. Berg. 2008. An Introduction to the Aquatic Insects of North America. Kendall/Hunt Publishing Company. Dubuque, Estados Unidos. 1159 p.
- MINAE-S. 2007. Reglamento Nacional para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales. Decreto, No. 33903, La Gaceta No. 178. San José, Costa Rica.

Ramírez, A. 2010. Métodos de Recolección. *Rev.Biol.Trop.* 58(4): 41-50.

Roldán, G. 1988. Guía para el estudio de los invertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia. Antioquia, Colombia. 218 p.

Smith, D.G. 2001. Amphipoda. Pennak's freshwater invertebrates of the United States: Porifera to Crustacea. John Wiley. 1451 p.

Springer, M. 2008 Aquatic insect diversity of Costa Rica: state of knowledge. *Rev. Biol. Trop.* 56(4):273-295.

Springer, M. 2010. Trichoptera. *Rev.Biol.Trop.* 58(4): 151-198.

Thorp, J. & A.P. Covich. 2001. Ecology and classification of North American Freshwater Invertebrates. Academic Press. Nueva York, Estados Unidos. 1056 p.

Primera toma de agua de Jasec en la parte alta de la Cuenca



Topografía de la cuenca en la parte media



Cauce antes de llegar al puesto II de Jasec (Embalse)



Cauce después del embalse en puesto II de Jasec



Caída antes de puesto III de Jasec (salida de la cuenca del Birrís)



Cauce después de la caída en puesto III de Jasec

