

Determinación de caudal ambiental para diferentes condiciones: una trayectoria de estudios de caso en Costa Rica

Environmental flow assessment under variable conditions: a series of case studies from Costa Rica

Laura Chavarría-Pizarro¹, Isabel Guzmán-Arias², Francisco Quesada-Alvarado³, Valeria Serrano-Núñez⁴, Fernando Watson-Hernández⁵


Fecha de recepción: 10 de junio, 2025

Fecha de aprobación: 29 de septiembre, 2025

Chavarría-Pizarro, L; Guzmán-Arias, I; Quesada-Alvarado, F; Serrano-Núñez, V; Watson-Hernández, F. Determinación de caudal ambiental para diferentes condiciones: una trayectoria de estudios de caso en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 104-115.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.8047>

1 Escuela de Biología. Centro de Investigación en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.


 laura.chavarria@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-7630-1104>

2 Escuela de Ingeniería Agrícola. Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola (CETIA) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 iguzman@itcr.ac.cr


 <https://orcid.org/0000-0002-5553-3977>


3 Universidad Nacional. Costa Rica. 

 ranqal@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-9025-3009>

4 Escuela de Ingeniería Agrícola. Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola (CETIA) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 vserrano@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-3708-9323>

5 Escuela de Ingeniería Agrícola. Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola (CETIA) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Costa Rica.

 fwatson@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-8258-4668>



Palabras clave

Ríos; ecosistemas; organismos; aprovechamiento; comunidades.

Resumen

La estimación del caudal ambiental en una fuente de agua superficial se puede determinar mediante diferentes metodologías que modifican su nivel de complejidad según las variables involucradas para su cálculo. Desde el Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola se han aplicado varias metodologías en las diferentes cuencas del país con la finalidad de aportar un registro de caudal ambiental en secciones de control de importancia estratégica en la gestión del recurso hídrico. Este artículo de revisión busca integrar la información obtenida en los estudios realizados para establecer una base de registros fundamentada científicamente para aplicación por parte de los tomadores de decisión y para futuros estudios de caudal ambiental. Los resultados ya obtenidos, permiten generar algunas conclusiones importantes, por ejemplo, se concluyó que para ríos que presentan una evidente degradación ambiental y poco uso por parte de las comunidades, como fue el caso del río Birris, la metodología más apropiada es la hidrológica. Para ríos que se atraviesan áreas protegidas, como el caso del río Pejibaye, la metodología hidrobiológica, en casos con impacto de actividades humanas sobre los ecosistemas acuáticos como en el caso del río Pirrís, la metodología que mejor se adaptó fue también hidrobiológica y, finalmente cuando las cuencas cuentan con características complejas y diferentes usos antropogénicos, como es el caso de los ríos Tempisque y Sarapiquí, la metodología más apropiada es la holística. Cada una de ellas seleccionada técnicamente bajo los parámetros requeridos para el cálculo de un régimen de caudal ambiental válido para cada condición.

Keywords

Rivers; ecosystems; organisms; utilization; communities.

Abstract

The estimation of environmental flow in a surface water source can be determined using different methodologies that vary in complexity depending on the variables involved in their calculation. The Center for Research and Extension in Agricultural Technology and Engineering has applied several methodologies in different watersheds across the country to provide a record of environmental flow in control sections of strategic importance for water resource management. This review article seeks to integrate the information obtained from the studies conducted to establish a scientifically based record base for application by decision-makers and for future environmental flow studies. The results obtained allow for some important conclusions. For example, it was concluded that for rivers with evident environmental degradation and little use by communities, as was the case with the Birris River, the most appropriate methodology is the hydrological one. For rivers that flow through protected areas, such as the Pejibaye River, the hydrobiological methodology was also best suited. In cases where human activities impact aquatic ecosystems, as in the case of the Pirrís River, the methodology that best suited the river was also hydrobiological. Finally, when the basins have complex characteristics and different anthropogenic uses, as is the case of the Tempisque and Sarapiquí rivers, the most appropriate methodology is the holistic one. Each of these methods was technically selected under the parameters required to calculate an environmental flow regime valid for each condition.

Introducción

El caudal ambiental se establece como una asignación del régimen hidrológico natural de un río, para preservar la integridad de los sistemas ecológicos y los diferentes usos antrópicos en la fuente [1]. Actualmente, a nivel mundial, se reconoce la importancia de la determinación de los caudales ambientales para la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, lo que ha sido aceptado por muchos países a través de la declaración de Brisbane celebrada en el 2007, en la cual se definió que los caudales ambientales son “la cantidad, periodicidad y calidad del agua que se requiere para sostener los ecosistemas dulceacuícolas, estuarios y el bienestar humano que depende de estos ecosistemas” [2].

Los regímenes de caudales ambientales son utilizados como herramienta para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico ante la problemática generalizada de su uso excesivo y del deterioro de los ecosistemas acuáticos [3]. El acatamiento de la asignación de un caudal ambiental requiere de la participación social, un marco institucional y normativo, así como de políticas claras y efectivas [4]. De lo contrario, la tendencia local y mundial continuaría inclinándose hacia la creciente demanda de agua para usos socio-productivos y el consecuente deterioro de su calidad. Hasta ahora, el escenario del recurso hídrico ha sido acaparado por el crecimiento económico, el deterioro ambiental, la reducción de los caudales por el efecto de fenómenos naturales y de las actividades humanas, así como los aspectos socio políticos y legales en torno al aprovechamiento del agua; lo cual ha desencadenado una serie de conflictos socio ambientales que han generado una presión sobre la demanda de agua, en otra perspectiva, bajo el modelo de desarrollo vigente se ha afectado la salud de los ambientes acuáticos, con los consecuentes impactos en los ecosistemas y en las actividades humanas [5]. El problema también ha sido agravado con el proceso de cambio climático, que además ha dejado en evidencia la situación crítica en la que se encuentran muchos ecosistemas. En este contexto, se han impulsado iniciativas para la determinación del caudal ambiental a nivel mundial y nacional, como lo señala la Guía de selección de metodologías para la estimación del caudal ambiental en Costa Rica [6], la cual proporciona criterios técnicos y metodológicos para seleccionar el enfoque más adecuado según las características de cada cuenca.

Costa Rica es un país cuenta con un capital hídrico estimado en 24 m³ por persona al año [7]. Esta riqueza en recursos hídricos se atribuye a diversas características particulares del territorio, como su clima, ubicación geográfica, sistema orográfico, cobertura vegetal, entre otros factores [8]. A pesar de esta condición, el aprovechamiento del potencial hídrico es limitado y las acciones orientadas a garantizar un uso sostenible son difíciles de gestionar. Sin embargo, se promueve una cultura creciente de planificación del agua, reforzada por el cumplimiento de compromisos que garanticen la satisfacción de la demanda presente y futura de todos los usuarios incluyendo a los ecosistemas.

En Costa Rica, la determinación del caudal ambiental se estableció a partir de 1991, bajo un enfoque porcentual del caudal aforado en la fuente de agua. Este porcentaje, destinado a garantizar la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos, ha variado de acuerdo con los usos presentes en cada cuenca; oscilando entre un 10% y un 20% del caudal medio del río [6]. Este porcentaje ha sido cuestionado, debido al aumento de la población, variedad de actividades productivas, cambios en la dinámica de las fuentes de agua, toda vez que, en muchos casos, no ha sido suficiente para preservar el nivel de agua apropiado. Esto ha empezado a cambiar desde el año 2021, cuando el Ministerio de Ambiente y Energía por medio del Decreto Ejecutivo N° 43242-MINAE reglamentó la determinación del caudal ambiental en el país. Documento que surge de un proceso participativo dirigido por la Dirección de Agua del MINAE y en donde el Instituto Tecnológico de Costa Rica, por parte de las escuelas y centros de investigación de Ingeniería Agrícola y Biología tuvieron una participación destacada.

Existen varias metodologías para el cálculo del caudal ambiental, sin embargo, la determinación de la metodología adecuada para cada cuenca dependerá de las características particulares en cada caso y los registros de información hidrometeorológica con que se cuenten. A pesar de que las metodologías de estimación de caudales ambientales son variadas en general se fundamentan en: métodos hidrológicos, hidrobiológicos, hidráulicos, eco-hidráulicos y holísticos [9], [10]. Estos métodos y sus variaciones, aunados a las características particulares de las cuencas de Costa Rica, hace necesaria la implementación de metodologías que se adapten a las diferentes condiciones y que a su vez permitan mantener la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos y del recurso para uso de las comunidades. Diferentes instituciones han aplicado algunas metodologías de acuerdo con las necesidades de sus proyectos, especialmente el ICE en el área de producción de energía hidroeléctrica. Por este motivo, el Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola del TEC estableció la ruta de investigación bajo convenio con la Dirección de Agua del MINAE, con el objetivo de aplicar varias metodologías en la determinación de caudal para puntos estratégicos en cada unidad hidrológica del país. Hasta el momento se han realizado cuatro investigaciones donde se han validado tres metodologías: hidrológica para la subcuenca del río Birrís [11]; hidrobiológica para la subcuenca del río Pejibaye [12] y el río Pirrís; y holística en el río Tempisque [13]. En este artículo se pretende integrar la información obtenida de los cuatro estudios realizados hasta el momento para que sirva como insumo para futuros estudios de caudal ambiental en el país.

Metodología Hidrológica

Los métodos hidrológicos tienen una mayor posibilidad de aplicación por requerir menos cantidad de variables, lo que los convierte en una opción más práctica y económica si se tienen los registros hidrometeorológicos históricos para determinar los caudales deseables, que garantice un nivel de protección de los ecosistemas fluviales [14], dicho registro se recomienda que sea mayor o igual a 20 años. De esta forma se establecen porcentajes de caudal, se determinan índices y se opta por un caudal calificado o establecido antes como normativo, o, se calcula partiendo de recomendaciones previamente establecidas.

Río Birrís

La cuenca del río Birrís pertenece a la cuenca alta del río Reventazón, 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 m.s.n.m.) hasta los 100 m.s.n.m. (en la estación de puesto 3 de la empresa Jasec). En esta cuenca se encuentra la planta hidroeléctrica de JASEC la cual toma el agua del río Birrís y Pacayas y cuenta con dos embalses (Puesto I y puesto II). 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 [15]. También presenta un evidente deterioro ambiental por las aguas vertidas.

Debido a que la cuenca presentaba una fuerte degradación biótica no se podía tomar en cuenta el componente biológico, por la posible ausencia de especies indicadoras de caudal, como por ejemplo, los géneros *Anacroneuria* (Plecoptera: Perlidae) o *Corydalus* (Megaloptera: Corydalidae). Además, tomando en consideración la alteración de los regímenes de caudal producto de las concesiones otorgadas, se determinó que la metodología más adecuada para el cálculo del caudal óptimo para esta cuenca era la hidrológica, es decir, cuando los ríos presentan una evidente degradación ambiental y poco uso por parte de las comunidades, esta es la metodología que más apropiada para determinar el caudal. En otros países como Irán [16] la combinación de varios modelos hidráulicos fue utilizada para estimar el caudal ambiental en

el caso de un río donde no se contaba con suficientes datos ecológicos. Los investigadores utilizaron los modelos hidrológicos para estimar el caudal en relación con los requerimientos del río.

Książek et al. [17] reconocen que los métodos hidrológicos por sí solos pueden tener limitaciones en la estimación del caudal debido a la complejidad y heterogeneidad de los cuerpos de agua. Por este motivo, recomiendan el uso de una combinación de métodos hidrológicos e hidráulicos, en su investigación los autores prueban varios modelos y seleccionan los que hacen mejores estimaciones incluso en ríos con alta biodiversidad. En los dos casos mencionados anteriormente, los investigadores utilizaron varios modelos, tanto hidrológicos como hidráulicos (o en combinación) para la estimación del caudal, para compensar la falta de datos biológicos, y hacer una mejor estimación. Sin embargo, debido a que estos modelos en algunas ocasiones tienen limitaciones para integrar otros factores como: geomorfología fluvial, agua subterránea, vegetación riparia y la diversidad de los ecosistemas acuáticos [18]; es recomendable, principalmente en regiones tropicales, y cuando se tengan datos de diversidad utilizar una metodología holística o hidrobiológica, para obtener una estimación de caudal más robusta.

Metodología Hidrobiológica

El método hidrobiológico o método de simulación de hábitat determina el caudal ambiental para ciertas especies indicadoras, y requiere de información hidrológica, hidráulica y biológica [19]. El hábitat físico (velocidad del flujo, profundidad y sustrato) y las preferencias de hábitat de los organismos indicadores se monitorean en campo y se modelan utilizando software de modelación hidráulica en una o dos dimensiones, para diferentes descargas [20]. Debido a que esta metodología incorpora el componente biológico, se decidió utilizarla para determinar el caudal ambiental del río Pejibaye por las características que presenta la cuenca y en el caso del río Pirrís, para determinar el efecto de un proyecto hidroeléctrico en el ecosistema.

Río Pejibaye

La cuenca del río Pejibaye está ubicada en el cantón de Jiménez en la provincia de Cartago, pertenece al sistema de la Cuenca Alta del Río Reventazón ubicada en la vertiente del Caribe de Costa Rica. Cuenta con un área aproximada de 250 km² y un rango de altitud que va desde 570 a los 2680 m.s.n.m. Presenta áreas con pendientes mayores a 60%. Asimismo, se caracteriza por tener un promedio anual de precipitación entre los 2800 y 8000 mm, en la zona centro oeste de la cuenca la precipitación puede ser de 9000 mm/año, esto provoca que sea una de las zonas más lluviosas del país, por lo que hace que sea un lugar con gran potencial hidroeléctrico con un caudal promedio anual de 34 m³/s [21]. Dado que el 80% de la cuenca se encuentra cubierta por bosque denso, debido a que atraviesa el Parque Nacional Tapantí, y por lo tanto es importante para la conservación de especies, es que se decidió que la metodología más apropiada para estimar el caudal era la hidrobiológica. Las comunidades de fauna asociadas a las corrientes están adaptadas a las fluctuaciones naturales en magnitud, frecuencia, y duración de las corrientes de flujo ya sea alto, intermedio o bajo. Además, el caudal afecta a los organismos acuáticos indirectamente al influenciar la composición del sustrato, las propiedades químicas del agua, la disponibilidad de nutrientes, partículas orgánicas y del hábitat [22]. Por ello, los organismos indicadores son muy importantes en la determinación del caudal en los ríos que atraviesan áreas protegidas, ya que, al ser susceptibles a cambios en el ambiente, se debe asegurar un caudal apropiado para mantener el funcionamiento ecológico del ecosistema.

Río Pirrís

El río Pirrís junto con el río Grande de Candelaria, conforman la cuenca del río Parrita, ubicada en la vertiente del Pacífico. Esta cuenca presenta en su parte alta y media una topografía bastante ondulada (2400 y los 3140 m.s.n.m (zona alta), 700–1400 m s.n.m (zona media) y 0–700 m s.n.m (zona baja)) [23]. La precipitación anual varía según la altitud: de 1500 a 3000 mm en la parte alta, de 3000 a 4000 mm en la parte media, y de 4000 a 5000 mm en la parte baja. Dentro del río Pirrís se sitúa el Proyecto Hidroeléctrico Pirrís (P.H. Pirrís) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) [24]. Debido a que la infraestructura se localiza en el cauce principal del río ésta genera un alto impacto en la fauna dulceacuícola, dado que hay un bloqueo de una quinta parte de la cuenca que se encuentra por encima de los 1080 m.s.n.m y la longitud del tramo crítico [25]. Al ser una obstrucción en un cuerpo de agua se originan impactos biofísicos negativos, como: variación repentina de caudales, cambios morfológicos, aumento de sedimentos en los embalses, disminución o desaparición de biodiversidad acuática y terrestre, eliminación de cobertura boscosa, entre otros [26]. Como en esta cuenca se estimó la afectación del proyecto hidroeléctrico en la biota acuática considerando escenarios de cambio climático, se seleccionó la metodología hidrobiológica. A pesar de que las especies que habitan en los ríos tienen la capacidad física y evolutiva de adaptarse a diversos eventos que ocurren en el medio como lo son las sequías, crecidas estacionales u otros eventos de índole natural; las variaciones repentinas e inconsistentes de grandes volúmenes de agua generan que los ecosistemas acuáticos sufran un máximo impacto, como es el caso de los cambios que provocan los embalses hidroeléctricos [27]. En un escenario crítico como este, es preciso, dentro de la gestión del recurso hídrico, contar con información que resguarde el caudal ambiental de esta y otras cuencas con características similares.

Los modelos hidrobiológicos han sido utilizados de forma exitosa en diferentes estudios. Por ejemplo, Pinna et al. [28] aplicaron la metodología en tres ríos de Italia donde utilizaron modelación del hábitat de macroinvertebrados. Los modelos identificaron con alta precisión y confianza la respuesta de las comunidades de macroinvertebrados a las alteraciones en el flujo y modificaciones de los ríos, demostrando que esta información se puede utilizar para la determinación del caudal, y para garantizar un mejor manejo de los recursos acuáticos. Vazquez et al. [29] determinaron a través de modelos aditivos generalizados que géneros como *Baetodes* (Ephemeroptera: Baetidae), *Anacroneuria* (Plecoptera: Perlidae) y *Atopsyche* (Trichoptera: Hydrobiosidae) (géneros también presentes en Costa Rica), pueden ser utilizados como indicadores de caudal debido a su preferencia por hábitats con corrientes rápidas, y que podrían ser afectadas por una disminución del caudal. De acuerdo con los requerimientos de estas especies los autores hacen la recomendación del caudal y sobre otras características que deberían mantenerse en el río para proteger estas especies. Finalmente, Arthington et al. [30] hicieron una revisión de 13 casos donde se utilizaron diferentes metodologías para determinar el caudal ambiental en 10 países. Entre otros resultados, los autores detectaron problemas y fortalezas de las diferentes metodologías utilizadas. Sin embargo, para todos los casos concluyen que, al implementarse los caudales estimados, los ecosistemas acuáticos se beneficiaron de diferentes formas como: aumentando la cantidad de hábitat para peces y macroinvertebrados, se incrementó la visitación de animales, aumentó el acceso a las llanuras aluviales, y aumentaron los bosques de galería.

Las conclusiones a las que llegan Arthington et al. [30] en relación con la mejora de los ecosistemas acuáticos al implementar el caudal ambiental, puede estar relacionado a que, en el caso de la metodología hidrobiológica, se estudia la relación entre el régimen de flujo y la respuesta ecológica de los organismos, la cual es muy importante para mitigar el impacto que podría generar la modificación del caudal ambiental. Al incorporar datos biológicos con hidrológicos, se puede proponer estrategias de manejo sostenible en cuencas que

permitan mantener los ecosistemas ecológicamente estables, pero que a su vez permitan el aprovechamiento del recurso por parte de las comunidades. Por este motivo, se recomienda el uso de esta metodología en ríos que se encuentran en áreas protegidas y cuando se quiere determinar el impacto de actividades humanas sobre los ecosistemas acuáticos.

Metodología Holística

Cuando se interrelacionan las condiciones hidrológicas de un lugar, con los ecosistemas asociados y la población humana con su amplia diversidad de aprovechamientos del agua, se da el surgimiento de las metodologías holísticas para la integración de todos los aspectos. Las metodologías holísticas son métodos integrales y que requieren de aportaciones y conocimientos multidisciplinarios [20]. Las metodologías pueden ser “bottom-up” diseñados para construir un régimen de caudales modificado mediante la adición de componentes del caudal a una línea de base de caudales nulos, y “top-down”, el cual indica cuanto se puede modificar el régimen de caudal de un río antes de que los ecosistemas acuáticos cambien notablemente o se degrade gravemente [31].

Río Tempisque

La cuenca del río Tempisque es la más grande de Costa Rica con una extensión de 5404,6 km² ocupa un 53% del territorio de la provincia de Guanacaste. Tiene una elevación media de 220 m.s.n.m. y una temperatura media anual de 26,78 °C aproximadamente. Sus condiciones climáticas se caracterizan por una extensa época seca, que provoca que algunas partes de la cuenca, así como sus afluentes se sequen en su totalidad; en tanto que en la época lluviosa se presentan desbordamientos [32]. La disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca se ha visto amenazada por el aumento y sobreexplotación del agua superficial y subterránea, la deforestación en sitios de importancia hídrica para el desarrollo de otras actividades, lo cual afecta el comportamiento natural del río y pone en peligro las funciones ecológicas de la cuenca, sobre todo durante la estación seca cuando se dan bajas condiciones de caudal y extracciones de agua por concesiones [32], [33]. Estas alteraciones impactan directamente la dinámica natural del río, y en consecuencia, el hábitat de las especies de fauna que dependen de él. Asimismo, limita el otorgamiento de nuevas concesiones de agua, lo que resalta la necesidad de establecer un caudal ambiental.

En este contexto, el estudio de Jiménez Ramón et al. constituye un referente técnico y conceptual inicial para la gestión de la cuenca del río Tempisque [34]. Dadas las características que presenta la cuenca, como: una marcada estacionalidad, una importante cantidad de concesiones, diferentes usos sociales (extracción de arena, agricultura y ganadería, turismo), así como una gran diversidad biológica asociada ya que atraviesa zonas protegidas como los Parques Nacionales Guanacaste y Palo Verde, la Reserva Biológica Lomas de Barbudal, los Refugios de Vida Silvestre Cipancí y Dr Rafael Lucas Rodríguez, y alimenta humedales como los de Corral de Piedra; se determinó que el método más apropiado para la determinación del caudal ambiental es el holístico. En un área de esta complejidad es importante incluir en el proceso a las partes interesadas como las comunidades locales, las municipalidades, las industrias, el sector agrícola, organismos gubernamentales locales y nacionales, ONGs, instituciones científicas, y organismos de conservación de la naturaleza, entre otros. Estos grupos representan inevitablemente una amplia variedad de puntos de vista, y es poco probable que lleguen a un consenso ante una solicitud aislada para que se acepte que parte del agua del río no esté disponible para su consumo; sin embargo, aplicando la metodología holística se puede obtener un criterio que permita aprovechar el recurso de una forma integral y sostenible.

Río Sarapiquí

El río Sarapiquí, aún en etapa de estudio para determinación de caudal ambiental, nace en las faldas del volcán Barva a 1650 msnm y desemboca en el río San Juan a 17 msnm y tiene una extensión de 2025 km², la cuenca presenta un clima tropical lluvioso como una precipitación anual entre 3000 y 5000 [35], [36]. La cobertura predominante es el bosque (54,7% del área); 51,4% de esta cobertura se encuentra dentro de áreas silvestres protegidas en la parte alta de la cuenca [35], también alberga zonas de pastizales. En la cuenca se registran 51 comunidades y 71 asentamientos campesinos, principalmente en la cuenca media, la población se dedica a labores agrícolas y ganaderas, también se ha dado una importante expansión de monocultivos como piña y banano. La cuenca del río Sarapiquí es una región de gran importancia natural y económica debido a las diversas actividades que se desarrollan en ella, como la agricultura, la industria agrícola, el comercio, la extracción de recursos naturales y el turismo.

De acuerdo con Sánchez et al. [35] el desarrollo antropogénico en la cuenca ha llevado a una alta dependencia de las actividades en los cauces principales, lo que ha aumentado el acceso a las márgenes de los ríos por parte de pobladores y turistas, generando problemas de contaminación y afectando la calidad y cantidad del agua. Por lo que, para preservar la calidad del agua en la cuenca, es esencial adoptar un enfoque integral que incluya la mitigación de focos de contaminación mediante la corrección de prácticas productivas y la educación ambiental en las comunidades cercanas a los cursos de agua. En este contexto, la implementación de una metodología de caudal ambiental en la cuenca del río Sarapiquí permitiría mantener el equilibrio de los componentes naturales involucrados en el ciclo hidrológico y proteger la integridad de los sistemas ecológicos. De esta manera se podría asegurar el uso sostenible del recurso hídrico por parte de las actividades humanas, garantizando un régimen hidrológico adecuado y una calidad de agua apropiada [1].

La metodología holística a nivel global tiene menor cantidad de estudios si se compara con las otras metodologías anteriormente detalladas, esto debido a que suele ser más costosa al tener que implementar más aspectos a evaluar [37]. Sin embargo, suelen ser más completas y dar una visión más amplia del uso que se le da al río. En la revisión sobre caudales ambientales en la India, realizado por Verma et al. [37], mencionan que en los ríos Ganga y Alaknanda-Bhagirathi, determinaron un caudal ambiental del 72% del caudal promedio anual para la cuenca media y uno de 47% para la cuenca baja. El estudio consideró múltiples subcomponentes, incluyendo hidrología, geomorfología fluvial, hidráulica, calidad del agua, biodiversidad, medios de vida y aspectos culturales/espirituales.

Otro ejemplo, es el estudio realizado por Wei et al. [38] aplicando un método holístico mejorado para determinar el caudal ambiental en la sección de Shaanxi de la cuenca del río Wei, una región que enfrenta una intensa competencia por el uso del agua y graves problemas ambientales, similar a lo que se observa en la cuenca del Tempisque. Este método mejorado integró varios modelos y técnicas para calcular el agua requerida para cuatro subcomponentes del caudal ambiental (flujo ecológico básico para la existencia de peces, demanda de agua para el transporte de sedimentos, flujo ambiental para la calidad del agua, y demanda de agua para paisajes acuáticos), considerando además principios clave como el balance hídrico (incluyendo el flujo de afluentes y la captación de agua en secciones clave) y la regionalización de la función eco-ambiental. Crucialmente, los investigadores aplicaron la teoría de las partes interesadas (stakeholders) en el desarrollo de recursos hídricos, proponiendo que el gobierno actúe como representante del beneficio público del ecosistema y participe en discusiones de mesa redonda para coordinar la competencia de uso del agua. Este último apartado es lo que se quiere lograr con el método holístico, donde hay una participación activa de investigadores, comunidades asociadas a las cuencas de interés y del gobierno.

Tong et al. [39] aplicaron esta metodología en el río Yen de Vietnam; y aunque los autores no tomaron datos biológicos, si tuvieron acceso a bases de datos para la determinación del caudal. De esta forma, lograron establecer un régimen de caudal para las diferentes estaciones y para diferentes áreas del río, lo que representa una estimación más robusta al no recomendar únicamente un caudal mínimo para todo el año. Finalmente, en la revisión realizada por Arthington et al. [30] otra de las conclusiones a las que llegan los autores es que, para lograr un mejor manejo de los recursos hídricos, y tener una mejor estimación del caudal, es recomendable utilizar una metodología integral como la holística, ya que permite obtener resultados más robustos, e involucrar a las diferentes partes interesadas de la sociedad. Por estos motivos, concluimos que para realizar un manejo adecuado del recurso hídrico de cuencas con características complejas y que presenten diferentes usos como las de los ríos Tempisque y Sarapiquí, es recomendable utilizar la metodología holística, ya que es la más apropiada para garantizar que el recurso hídrico pueda estar disponible no solo para los usos productivos, sino también para los organismos que lo habitan, y las comunidades que se encuentran alrededor.

Conclusiones

Queda evidenciado que las metodologías para determinación de caudal ambiental requieren un análisis previo de las características del sitio donde se desea implementar el cálculo, ya que las condiciones ecológicas, hidrogeomorfológicas y de aprovechamiento del agua, pueden guiar los criterios de selección. La incertidumbre de los resultados con cada metodología va a depender de la cantidad y calidad de la información de entrada más que de la metodología por sí misma, no obstante, en igualdad de condiciones, será siempre mejor la metodología que analice la mayor cantidad de variables y sus interacciones, y siempre y cuando permita el objetivo de implementar el caudal ambiental en la gestión del recurso hídrico. En términos prácticos, ninguna metodología es mejor que otra, sino que cada una se aplica sobre los aspectos de disponibilidad de información para el logro de un resultado útil.

La metodología hidrológica es apta para ser aplicada en lugares donde las condiciones no permiten llevar a cabo el muestreo de otras variables o cuando se conoce de antemano que no hay presencia de indicadores biológicos, como es el caso del río Birris. O bien cuando se quiere hacer un aprovechamiento a pequeña escala, con poca extracción de agua.

La metodología hidrobiológica, además de la modelación hidrológica que se genera a partir de los registros de datos hidrometeorológicos, integra el análisis de especies de peces y macroinvertebrados acuáticos y su relación con variables hidráulicas del río para conseguir la simulación de hábitat que, determina en gran medida el caudal ambiental en un sitio específico, tal y como se ha aplicado en los ríos Pejibaye y Pirris, este último, bajo el enfoque de detección de impactos por la presencia y operación del Proyecto Hidroeléctrico Pirris.

La metodología holística, integra un componente más a los procesos de cálculo de la metodología hidrobiológica en combinación con variables hidráulicas, se trata del componente social, mismo que busca rescatar y validar tanto los usos productivos como los usos domésticos, recreativos y culturales de las poblaciones cercanas al río, tal es la experiencia de cálculo generada en el río Tempisque y más recientemente en el río Sarapiquí.

La ruta de investigación en caudal ambiental gestada desde el Centro de Investigación y Extensión en Tecnología e Ingeniería Agrícola y el Centro de Investigación en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica, colocan al TEC como ente pionero y referente en este tema tan importante para la gestión integrada del recurso hídrico en el país.

Agradecimientos

Dirección de Agua, Ministerio de Ambiente y Energía

Instituto Costarricense de Electricidad

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

Referencias

- [1] Y. Martínez Valdés y V. M. Villalejo García, "A 10 años de la declaración de Brisbane: Mirada a los caudales ecológicos y ambientales", *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 39, núm. 2, pp. 16–30, 2018, [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000200002&lng=es&tlng=es
- [2] The Brisbane Declaration, "Environmental flows are essential for freshwater ecosystem health and human well-being", en *10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference*, Brisbane, Australia: Conservation Gateway, sep. 2007. [En línea]. Disponible en: <https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/ELOHA/Pages/Brisbane-Declaration.aspx>
- [3] I. C. Overton *et al.*, "Implementing environmental flows in integrated water resources management and the ecosystem approach", *Hydrological Sciences Journal*, vol. 59, núm. 3–4, pp. 860–877, abr. 2014, doi: 10.1080/02626667.2014.897408.
- [4] Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO), *Qué son los caudales ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay*, vol. 34. Montevideo, Uruguay: PHI-LAC, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000227701.locale=en>
- [5] M. Kuemmerlen, P. Reichert, R. Siber, y N. Schuwirth, "Ecological assessment of river networks: From reach to catchment scale", *Science of The Total Environment*, vol. 650, pp. 1613–1627, feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.019.
- [6] Comisión de Caudal Ambiental, "Guía de selección de metodologías para la estimación del caudal ambiental en Costa Rica", mar. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://da.go.cr/wp-content/uploads/2021/02/GUIA-SELECCION-METODOLOGIAS-ESTIMACION-CAUDAL-AMBIENTAL-EN-COSTA-RICA.pdf>
- [7] Global Water Partnership (GWP), "La situación de los recursos hídricos en Centroamérica: Hacia una gestión integrada", Tegucigalpa, Honduras, 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/situacion-de-los-recursos-hidricos_fin.pdf
- [8] H. G. Hidalgo León, "Los recursos hídricos en Costa Rica: Un enfoque estratégico", en *Manografías del agua*, Universidad de Costa Rica, 2012, pp. 203–219. [En línea]. Disponible en: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/09e1f407-e68e-4e68-ab76-de4e808a6596>
- [9] L. Van Niekerk *et al.*, "An environmental flow determination method for integrating multiple-scale ecohydrological and complex ecosystem processes in estuaries", *Science of The Total Environment*, vol. 656, pp. 482–494, mar. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.276.
- [10] C. F. Hao, L. M. He, C. W. Niu, y Y. W. Jia, "A review of environmental flow assessment: methodologies and application in the Qianhe River", *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 39, núm. Art. no. 012067, ago. 2016, doi: 10.1088/1755-1315/39/1/012067.
- [11] I. Guzmán-Arias, F. Watson, y K. Villagra-Mendoza, "Determinación del caudal ambiental en el río Birris, Costa Rica", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 32, núm. 4, pp. 18–27, oct. 2019, doi: 10.18845/tm.v32i4.4786.
- [12] F. Watson-Hernández, L. Chavarría-Pizarro, F. Quesada-Alvarado, y I. Guzmán-Arias, "Determinación del caudal ambiental mediante una metodología hidrobiológica, considerando variables de cambio climático en el río Pejibaye, Cartago, Costa Rica", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, núm. 4, pp. 118–129, sep. 2021, doi: 10.18845/tm.v34i4.5223.
- [13] L. Chavarría-Pizarro *et al.*, "Determination of environmental flow using a holistic methodology in three river paths in the Tempisque River Basin, Costa Rica", *Hydrology*, vol. 11, núm. 10, Art. no. 159, sep. 2024, doi: 10.3390/hydrology11100159.
- [14] J. Alvarez y J. Huamán, "Hydrological models for the estimation of ecological flow", *Manglar*, vol. 19, núm. 2, pp. 201–207, jun. 2022, doi: 10.17268/manglar.2022.025.

- [15] E. Lianes, M. Marchamalo, y M. Roldán, "Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birris, Costa Rica", *Agronomía Costarricense*, vol. 33, núm. 2, pp. 217–235, may 2009, doi: 10.15517/rac.v33i2.6722.
- [16] S. Shaeri Karimi, M. Yasi, y S. Eslamian, "Use of hydrological methods for assessment of environmental flow in a river reach", *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 9, núm. 3, pp. 549–558, jul. 2012, doi: 10.1007/s13762-012-0062-6.
- [17] L. Książek, A. Woś, J. Florek, M. Wyrębek, D. Młyński, y A. Wałęga, "Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow: Wisłoka river, Poland: case study", *Environ Monit Assess*, vol. 191, núm. 4, Art. no. 254, abr. 2019, doi: 10.1007/s10661-019-7402-7.
- [18] U. Sharma y V. Dutta, "Establishing environmental flows for intermittent tropical rivers: Why hydrological methods are not adequate?", *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 17, núm. 5, pp. 2949–2966, may 2020, doi: 10.1007/s13762-020-02680-6.
- [19] F. Armas-Vargas, O. Escolero, D. García de Jalón, L. Zambrano, M. González del Tánago, y S. Kralisch, "Proposing environmental flows based on physical habitat simulation for five fish species in the Lower Duero River Basin, Mexico", *Hidrobiológica*, vol. 27, núm. 2, pp. 185–200, ago. 2017, [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0188-88972017000200185&lng=pt&nrm=iso
- [20] S. Schmutz y J. Sendzimir, Eds., *Riverine Ecosystem Management*, 1a ed. Cham, Suiza: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-73250-3.
- [21] C. A. Zuleta Salmón, "Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del Río Pejibaye, Costa Rica", Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Cartago, Costa Rica, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9025>
- [22] Z. S. Dewson, A. B. W. James, y R. G. Death, "A review of the consequences of decreased flow for instream habitat and macroinvertebrates", *J North Am Benthol Soc*, vol. 26, núm. 3, pp. 401–415, sep. 2007, doi: 10.1899/06-110.1.
- [23] N. Rojas-Morales, *Estudio de cuencas hidrográficas de Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica (IMN), 2011. [En línea]. Disponible en: <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/estudio-de-las-cuencas-hidrograficas-de-costa-rica/>
- [24] M. Chinchilla, A. Alvarado, y R. Mata, "Capacidad de las tierras para uso agrícola en la subcuenca media-alta del río Pirris, los Santos, Costa Rica", *Agronomía Costarricense*, vol. 35, núm. 1, pp. 109–130, 2011, [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242011000100006&lng=en&tlng=es.
- [25] A. Farah Pérez, "Fragmentación del hábitat por represas hidroeléctricas para la ictiofauna dulceacuícola en Costa Rica", Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/e8b1a144-1be0-4344-8ede-511591b2ab8f>
- [26] A. Gutiérrez Arguedas, "'¡Ríos para la vida!' Conflictos socio-ambientales por proyectos hidroeléctricos y el movimiento social en defensa de los ríos en Costa Rica", en *Agua y poder en Costa Rica*, F. Alpízar R, Ed., San José, Costa Rica: Centro de Investigación y Estudios Políticos, Escuela de Ciencias Políticas, Vicerrectoría de Investigación, Universidad de Costa Rica, 2019, 2, pp. 53–104. [En línea]. Disponible en: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/2b5c6f4f-fdf0-4ff3-87ce-99a36f95c1d2>
- [27] N. J. Bipa, G. Stradiotti, M. Righetti, y G. R. Pisaturo, "Impacts of hydropoaking: A systematic review", *Science of The Total Environment*, vol. 912, núm. Art. no. 169251, feb. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169251.
- [28] B. Pinna, A. Laini, G. Negro, G. Burgazzi, P. Viaroli, y P. Vezza, "Physical habitat modeling for river macroinvertebrate communities", *J Environ Manage*, vol. 358, núm. Art. no. 120919, may 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120919.
- [29] R. Vázquez, D. Vimos-Lojano, y H. Hampel, "Habitat Suitability Curves for Freshwater Macroinvertebrates of Tropical Andean Rivers", *Water (Basel)*, vol. 12, núm. 10, Art. no. 2703, sep. 2020, doi: 10.3390/w12102703.
- [30] A. H. Arthington *et al.*, "Accelerating environmental flow implementation to bend the curve of global freshwater biodiversity loss", *Environmental Reviews*, vol. 32, núm. 3, pp. 387–413, sep. 2024, doi: 10.1139/er-2022-0126.
- [31] N. L. Poff, R. E. Tharme, y A. H. Arthington, "Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies", en *Water for the environment*, Avril C. Horne, J. Angus Webb, Michael J. Stewardson, Brian Richter, y Mike Acreman, Eds., Londres, Reino Unido: Academic Press, 2017, 11, pp. 203–236. doi: 10.1016/B978-0-12-803907-6.00011-5.

- [32] G. Barrantes Moreno, "Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Tempisque (Costa Rica) y su aplicación al ajuste de tarifas", *Revista Lebrez*, vol. 0, núm. 2, pp. 131–160, dic. 2010, doi: 10.15332/rl.v0i2.668.
- [33] D. Carvajal Vanegas, "Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del río Tempisquito, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica", Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Cartago, Costa Rica, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8705>
- [34] J. A. Jiménez Ramón, J. Calvo, F. Pizarro, E. González, y A. Jiménez Hernández, *Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica*. San José, Costa Rica: UICN ORMA, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://iucn.org/es/content/conceptualizacion-de-caudal-ambiental-en-costa-rica>
- [35] K. Sánchez, F. Jiménez, S. Velásquez, M. Piedra, y E. Romero, "Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica", *Recursos Naturales y Ambiente*, núm. 41, pp. 88–95, mar. 2004, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/7154>
- [36] E. Céspedes Vargas, G. Umaña Villalobos, y A. M. Silva Benavides, "Tolerancia de diez especies de diatomeas (Bacillariophyceae) a los factores físico-químicos del agua en el Río Sarapiquí, Costa Rica", *Rev Biol Trop*, vol. 64, núm. 1, pp. 105–116, jun. 2016, doi: 10.15517/rbt.v64i1.18295.
- [37] R. K. Verma, A. Pandey, S. Verma, y S. K. Mishra, "A Review of Environmental Flow Assessment Studies in India with Implementation Enabling Factors and Constraints", *Ecohydrology & Hydrobiology*, vol. 23, núm. 4, pp. 662–677, oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecohyd.2023.06.006.
- [38] N. Wei, K. Lu, J. Xie, y F. Yang, "Research on eco-environmental flow based on the improved holistic method and its application in Wei River Basin", *Water Supply*, vol. 22, núm. 8, pp. 6648–6659, ago. 2022, doi: 10.2166/ws.2022.278.
- [39] T. P. Tong *et al.*, "Applying a Holistic Approach to Environmental Flow Assessment in the Yen River Basin", *Water (Basel)*, vol. 16, núm. 8, Art. no. 1174, abr. 2024, doi: 10.3390/w16081174.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.