

## Caudal ambiental: herramienta ecohidrológica en la gestión de los recursos hídricos

Yaset Martínez Valdés email: [yaset@cih.cujae.edu.cu](mailto:yaset@cih.cujae.edu.cu)  
Profesor Auxiliar, Depto. Ing. Hidráulica, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH),  
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Marianao, La Habana.

Víctor Michel Villalejo García email: [victorv@hidro.cu](mailto:victorv@hidro.cu)  
Especialista Superior en Manejo y Desarrollo de los Recursos Hídricos, Dirección de  
Infraestructura Hidráulica, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), La Habana.

### RESUMEN

Este trabajo discute interdisciplinariamente la aplicación de los caudales ambientales como una herramienta ecohidrológica para la gestión integrada de los recursos hídricos, identificándose los principales desafíos y oportunidades para su implementación. Las distintas normativas internacionales expresan claramente el interés de planificar, gestionar y controlar los recursos hídricos desde una dimensión ambiental y ecosistémica, estableciendo que la unidad básica de gestión deberá ser la cuenca hidrográfica. El aporte desde diferentes disciplinas, entre ellas, la ecohidrología como una nueva interdisciplina, ha contribuido a lograr un enfoque integral sobre el concepto de caudales ambientales, necesario para trabajar los diversos aspectos hidrológicos, ecológicos, sociales, políticos y económicos implicados en el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos, su uso sustentable y su gestión desde una visión integrada de los recursos hídricos.

**Palabras clave:** caudal ambiental, ecohidrología, gestión integrada, recursos hídricos.

## Environmental flows: ecohydrological tool for integrated management of water resources

### ABSTRACT

This paper discusses interdisciplinary application of environmental flows as an ecohydrological tool for the integrated management of water resources, identifying the main challenges and opportunities for their implementation. The different international regulations clearly express the interest of planning, managing and controlling water resources from an environmental and ecosystem dimension, establishing that the basic management unit should be the watershed. The contribution from different disciplines, including ecohydrology as a new interdiscipline, has contributed to achieve a comprehensive approach on the concept of environmental flows, necessary to work the various hydrological, ecological, social, political and economic aspects involved in the operation of aquatic ecosystems, their sustainable use and their management from an integrated vision of water resources.

**Keywords:** environmental flow, ecohydrology, integrated management, water resources.

## INTRODUCCIÓN

Las presiones sobre los recursos de agua y tierra han afectado a ecosistemas y especies en las cuencas, lagunas, ríos, humedales y zonas costeras. La fragmentación por presas, el drenaje de humedales, la deforestación, los cambios en el uso de suelo y la contaminación son manifestaciones claras de estas presiones.

La desigual distribución de los recursos hídricos que se ha dado a lo largo del tiempo y el espacio, así como su modificación a causa del uso humano y mal manejo han desembocado en una crisis hídrica en muchas partes del mundo, trayendo con ello afectaciones ambientales que van en aumento desde la primera década del siglo XXI.

Dado el aumento poblacional basado en un crecimiento urbano descontrolado, los cambios en el uso del suelo, la degradación de la calidad del agua y el creciente impacto y vulnerabilidad de los desastres hidrológicos (inundaciones y sequías) y otros efectos hidrológicos relacionados con el cambio global y el cambio climático, la seguridad hídrica es cada vez más preocupante. Con el fin de abordar la complejidad y rapidez de los cambios ambientales y demográficos, la gestión de los recursos hídricos y las políticas de protección de este vital recurso, deben hacerse desde un enfoque holístico, multidisciplinario y compatible con el medio ambiente.

La seguridad hídrica se define como la capacidad de una determinada población para salvaguardar el acceso a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable, que permita sustentar tanto la salud humana como la del ecosistema, basándose en las cuencas hidrográficas, así como garantizar la protección de la vida y la propiedad contra riesgos relacionados con el agua (inundaciones, deslaves, subsidencia de suelos y sequías).

Ante la creciente inestabilidad climática, crecimiento demográfico y migraciones humanas y el surgimiento de nuevos centros geopolíticos que afectarán la economía internacional (incluyendo el incremento en el precio de los alimentos y un impacto ambiental intensificado), existe la urgente necesidad de hacer retroceder la degradación de los recursos hídricos y detener el avance de la pérdida de biodiversidad. La apreciación y optimización de los servicios del ecosistema para la sociedad, junto con el mejoramiento de la resiliencia de las cuencas hidrológicas ante el grado de presión climática y antropogénica podría contribuir enormemente a alcanzar esta meta.

Para lograr este objetivo, es necesario tener políticas claras y efectivas de gestión integrada de recursos hídricos e incorporar a las mismas herramientas que permitan fijar criterios cuantitativos de uso de agua que aseguren el cumplimiento tanto del bienestar humano como del mantenimiento de los ecosistemas.

Para abordar la problemática mundial del uso excesivo de los recursos hídricos y el deterioro de los ecosistemas acuáticos se utilizan los caudales ambientales como una herramienta ecohidrológica de la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH). Actualmente, se reconocen a los caudales ambientales como esenciales para la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, lo que ha sido mundialmente reconocido a través de la Conferencia de Brisbane, realizada en Australia en 2007. La aplicación de caudales ambientales requiere de un involucramiento social,

un marco institucional y normativo, así como de políticas claras y efectivas para su implementación.

## **DESARROLLO**

En el Antropoceno, con la sobre-ingeniería que se ha desarrollado en los paisajes urbanos y agrícolas, se ha producido una reducción de biomasa y materia orgánica, que ha conllevado a la modificación del ciclo hidrológico. De la situación modelo donde el componente biológico estabiliza el balance de calor y dinámica del agua en el nivel intermedio de perturbación, se ha pasado a un modelo antropizado en donde el ciclo hidrológico se acelera y se vuelve más estocástico y menos favorable para la biota y la humanidad (sequías e inundaciones cada vez más recurrentes). Además, estos procesos reducen el almacenamiento de carbono y la transferencia de nutrientes de los minerales a las formas orgánicas, impactando el ciclo de la materia en la naturaleza.

Para revertir dichos procesos negativos, hay que elaborar y poner en marcha una estrategia en dos pasos. El primer paso propuesto debe basarse en la reducción de uso de energía y materia por PIB (principio de la economía verde). El segundo paso propuesto se basa en la teoría ecohidrológica para regular los ciclos hidrológicos y de nutrientes en “ecosistemas novedosos” (agrícolas y urbanos) para mejorar la capacidad de conducción del ecosistema global. La mejora en la capacidad de conducción se entiende como la mejora relativa a los recursos hídricos, biodiversidad, servicios del ecosistema para la sociedad y la resiliencia ante las crecientes formas de impacto.

Para gestionar el agua resulta indispensable integrar aspectos sociales, económicos, políticos, ecológicos e hidrológicos, de forma de asegurar su uso sustentable a largo plazo. La GIRH promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua y la cuenca asociada, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, y sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas. Este enfoque involucra a la sociedad y a los diferentes intereses, buscando prevenir y resolver conflictos entre usuarios por la demanda de agua.

Es de vital importancia la participación activa de la sociedad y el análisis interdisciplinario en todas las etapas de formulación, planificación, implementación, gestión y control de recursos hídricos, evaluación de los planes y políticas del agua y en el desarrollo de las políticas de descentralización, ordenamiento territorial y desarrollo sustentable, mediante la creación de una nueva institucionalidad que se concreta en la formación de consejos regionales de recursos hídricos y comisiones de cuenca.

Para implementar políticas públicas para la gestión integrada de los recursos hídricos se debe partir de reconocer las principales debilidades que son comunes en la mayoría de los países: solapamiento de esfuerzos; desarticulación institucional; abordajes desde percepciones parciales o sectorizadas y creación de tensiones cuando se enfrentan diferentes intereses productivos, sociales y ecológicos relacionados al agua. No obstante, la cada vez más creciente conciencia ambiental y en particular el reconocimiento de la importancia del recurso hídrico, así como su relevancia ecológica, así como los avances en las normativas sobre recursos hídricos, se reconocen como las principales fortalezas que pueden ayudar a la implementación de la GIRH.

De este diagnóstico surge la necesidad de buscar consensos y abordar la temática de manera transversal e interdisciplinaria, donde se potencie una mayor integración, organización y esfuerzos de control para su cumplimiento. Se recomienda trabajar en la ampliación y mejoramiento de las redes de monitoreo de cantidad y calidad de las aguas. Por otra parte, se debe conocer los momentos y sitios críticos para establecer prioridades de aplicación de caudales ambientales, así como realizar experiencias piloto donde se apliquen la estimación de caudales ambientales. Se entiende que el método de estimación debería decidirse caso a caso, ya que los diferentes métodos presentan ventajas y desventajas en cuanto a los costos, rapidez de estimación, información y recursos económicos y humanos disponibles. Para lograr todos estos objetivos, es vital importancia, la asignación de recursos económicos y humanos de forma estratégica para estas acciones de gestión.

### **ENFOQUE ECOSISTÉMICO DE LA GIRH**

Millones de personas dependen de los servicios ecosistémicos provistos por las cuencas: ríos, lagunas, humedales, sistemas de agua subterránea y las cuencas altas proveen servicios ecosistémicos críticos que muchas veces son vitales para las comunidades, sociedades y economías. En particular los ecosistemas de agua dulce son extremadamente productivos y por eso toman gran parte de los niveles mínimos de subsistencia, especialmente de las poblaciones rurales pobres. Los servicios ecosistémicos contribuyen directamente al mantenimiento de la salud humana, en particular de la gente más pobre.

Varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) están relacionados directamente con el manejo del agua; alcanzar los objetivos de salud, reducción del hambre, suministro de agua y saneamiento; y, biodiversidad necesita en todos casos intervenciones de manejo de agua. Entonces invertir en la gestión hídrica puede contribuir de manera directa a algunas de las metas. Existe la necesidad de un vínculo más directo del papel de los servicios ecosistémicos con la agenda de los ODS (UNESCO 2012).

El enfoque ecosistémico en la gestión del agua complementa la filosofía actual de la GIRH, que se puede resumir en los siguientes principios (UNESCO 2012):

1. *Equidad*: la gestión del agua promueve la distribución equitativa de los costos y beneficios del uso y manejo de los recursos hídricos, y tiene como meta explícita aliviar la pobreza y crear una balanza entre géneros
2. *Eficiencia*: la gestión promueve el uso más eficiente y refleja el valor total del recurso, incluyendo valores de mercado, ecosistémicos y socioculturales
3. *Sostenibilidad*: el régimen de gestión del agua es autónomo y se adapta fácilmente a condiciones cambiantes
4. *Legitimidad*: las instituciones de gestión del agua tienen una base legal sana y sus decisiones y acciones se muestran legítimas y honestas por parte de todos los actores
5. *Responsabilidad*: las políticas y su práctica, los papeles y las responsabilidades conducen a usos eficientes, honestos y legítimos de los recursos hídricos y los diferentes actores son responsables de sus acciones
6. *Descentralización*: la toma de decisiones se hace al nivel más apropiado, considerando el poder y los recursos necesarios para implementar estas decisiones

7. *Participación*: todos los actores tienen la oportunidad de participar en las decisiones sobre la planificación y la gestión de los recursos hídricos y de estar involucrados en la solución de los conflictos del agua.

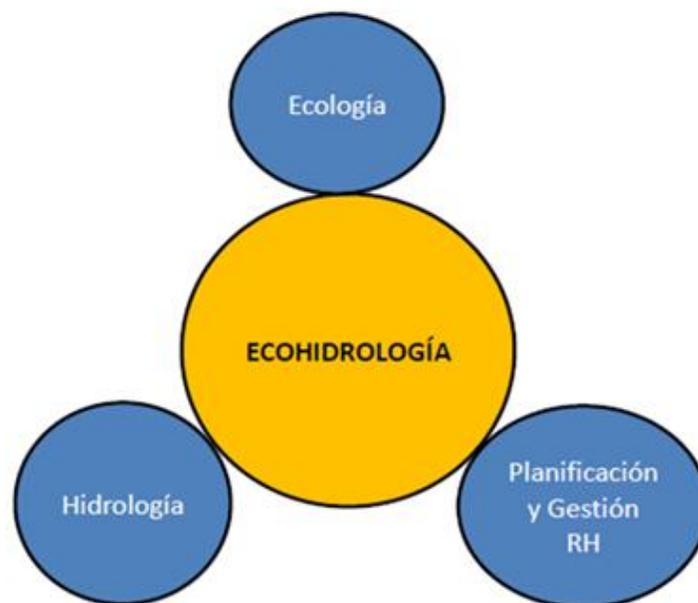
### **LA ECOHIDROLOGÍA COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN DE LA GIRH**

Durante la Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente en Dublín en 1992, reconocida mundialmente por los principios que allí se adoptaron para la gestión integrada de los recursos hídricos, surgió la ecohidrología en tanto una nueva ciencia cuyo nombre surge de la fusión de los términos “hidrología” y “ecología”, que propone precisamente una nueva metodología de enfoque multidisciplinaria para una gestión sustentable y de largo plazo de los recursos hídricos (figura 1).

En esta conferencia se revisaron las soluciones existentes en cuanto a las prácticas de gestión del agua y se llegó a la conclusión que para lograr la sustentabilidad de los recursos hídricos del planeta había que proponer nuevas soluciones y por lo tanto la necesidad de nuevos conceptos. Esta nueva ciencia se basa en la aplicación de los siguientes principios (Zalewski et al. 1997):

1. Restablecer y mantener los procesos evolutivos de circulación del agua, nutrientes y energía a escala de cuenca
2. Amplificar la capacidad de carga (solidez) de los ecosistemas frente a la presión antrópica
3. Usar las propiedades de los ecosistemas como herramientas de gestión del agua (ingeniería ecológica).

Zalewski et al. (1997) define la ecohidrología como un concepto científico que representa una nueva aproximación a la restauración y gestión sustentable del recurso hídrico y provee una herramienta adicional para la administración de la degradación ecológica del agua y de sus procesos en la superficie.



**Figura 1. Interrelación disciplinaria que conforma la ecohidrología**

Los principios de la ecohidrología son expresados en tres componentes secuenciales (Zalewski 2002a):

1. *Hidrológico*: La cuantificación del ciclo hidrológico en una cuenca, es un referente para una integración funcional de los procesos hidrológicos y biológicos
2. *Ecológico*: La integración de los procesos en las cuencas de los ríos pueden ser encaminados de manera que aumente la capacidad de transporte de la cuenca y mejore su servicio en el ecosistema
3. *Ingeniería ecológica*: La regulación de los procesos ecológicos e hidrológicos, basados en un acercamiento a un sistema integrado, es en efecto, una nueva herramienta para una gestión integrada de la cuenca (soluciones basadas en la naturaleza).

Este enfoque fue adoptado por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO a partir de la Quinta Fase de su Plan Estratégico en 1996, y desde entonces se ha difundido a nivel mundial, promoviendo actividades que tratan de incidir en la aplicación de estos tres principios.

La ecohidrología considera las interrelaciones funcionales entre la hidrología, los procesos involucrados en un ecosistema y su biota, dirigidas al manejo equilibrado del ecosistema. Los ecohidrólogos conciben una regulación del hidrosistema dual, utilizando simultáneamente los procesos ecológicos e hidrológicos, para salvaguardar su integridad ecológica global en unas condiciones alteradas por el hombre (Zalewski 2002b).

Con esta nueva interdisciplina se relacionan la hidrología con la ecología y los complejos procesos en el ciclo del agua o ciclo hidrológico. Esos procesos ocurren generalmente dentro de sistemas acuáticos (ríos, lagos, aguas subterráneas) y también en tierra y en el follaje vegetal.

En los sistemas acuáticos, la ecohidrología busca entender la regulación dual de cómo los procesos hidrológicos regulan a los ecológicos y a la inversa, como un proceso ecológico puede subsecuentemente regular a uno hidrológico. Así con la ecohidrología se integran los conocimientos de esos dos procesos y se usan para encontrar soluciones innovadoras a los problemas de la degradación de las cuencas de los ríos (Hannah et al. 2004).

La ecohidrología constituye un enfoque innovador en el ámbito de las ciencias ambientales que promueve la integración de la hidrología y la ecología con miras a la gestión sostenible de los recursos hídricos garantizando los procesos evolutivos de circulación de agua y nutrientes, así como los flujos energéticos a escala de las cuencas mediante la ordenación integrada de los procesos biológicos, biogeoquímicos e hidrológicos como instrumentos de gestión.

Se basa en el supuesto de que la gestión sostenible de los recursos hídricos depende de la capacidad para mantener procesos evolutivos de circulación de agua y nutrientes y de flujos energéticos a escala de las cuencas mediante la ordenación integrada de los procesos biológicos, biogeoquímicos e hidrológicos como instrumentos de gestión.

El desarrollo del concepto de ecohidrología refleja la necesidad apremiante de elaborar y poner en práctica métodos innovadores y eficaces en relación con su costo para mejorar la calidad del agua, frente a la presión creciente que se ejerce sobre los recursos de agua dulce (UNESCO 2010).

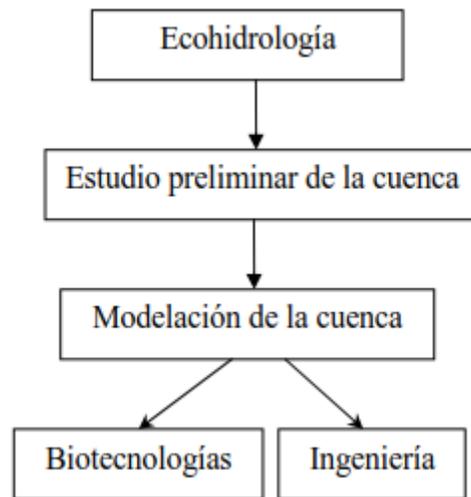
Según Zalewski et al. (1997) las hipótesis de trabajo de la ecohidrología son:

1. Para lograr un entendimiento profundo del régimen hidrológico y de la distribución de la biota en corredores fluviales en el presente, los cambios históricos deben ser analizados e interpretados.
2. Mejoramiento de la capacidad de resistencia, recuperación y amortiguamiento de corredores fluviales.
3. La vulnerabilidad de los ríos, embalses y estuarios depende de los patrones estacionales de procesos hidrológicos y bióticos y puede ser cambiado por el impacto humano.
4. Las cargas de nutrientes y sedimentos que alcanzan los sistemas acuáticos dependen fuertemente de las perturbaciones inducidas por el hombre sobre las características ecológicas e hidrológicas naturales de la cuenca.
5. La intensidad y duración de las crecientes son modificadas por las características biológicas de corredores fluviales, las cuales a su vez son modificadas por el régimen hidrológico.
6. El nivel de nutrientes en los ríos es influenciado por los aportes de agua subterránea y por la estructura biótica del valle del río.
7. El transporte y transformación de los contaminantes está altamente influenciado por el régimen hidráulico-hidrológico y por las características ecológicas de los corredores fluviales.
8. La aplicación de aproximaciones ecohidrológicas basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) a subsistemas de cuencas consistentes de ecotonos y conjuntos elementales, hace de la información hidrológica y ecohidrológica ganada en estas microescalas agregable a sistemas en niveles altos de abstracción. La integración de esta información dentro de conceptos hidrológicos conllevará una interpretación más profunda del régimen hidrológico de las cuencas.
9. El entendimiento comprensivo de los procesos ecohidrológicos y el mejoramiento de las capacidades predictivas forman la base para un manejo eficiente del costo de los sistemas hídricos y de los paisajes.
10. La optimización de la estructura de las zonas de ecotonos (como las zonas de defensa ribereñas) y de los humedales de planicies de inundación es la herramienta principal para la reducción de la transferencia de nutrientes desde la cuenca hacia el río u otros cuerpos hídricos aguas abajo.
11. Los índices para el planeamiento predictivo y el manejo sostenible de los recursos hídricos deben estar basados en los datos puntuales/locales y en estudios sobre procesos hidrológicos de gran escala.

Según los postulados planteados por Zalewski (2002a), los objetivos de la ecohidrología muestran por si mismos el marco metodológico a aplicar para la investigación en este campo (figura 2). Estos están basados en tres pasos:

1. El estudio preliminar de una cuenca comienza con una comprensión ecológica profunda del ambiente (clima, ciencia de suelo, vegetación, ocupación humana, etc.)
2. La prevención de la contaminación como el fundamento principal del desarrollo sostenible. Esto implica que para establecer un modelo de la cuenca se precisa ver y determinar fuentes y flujos de los agentes contaminadores. De este modelo, se debe generar un programa de gestión sostenible de uso de la tierra para la cuenca

3. Se deben poner varias tecnologías en ejecución para consolidar los ecosistemas considerando escenarios a largo plazo en la gestión, particularmente a través del modelo establecido previamente.



**Figura 2. Marco metodológico para la investigación en ecohidrología**

La cuenca, desde la ecohidrología, es considerada como un “macrosistema ecológico” en el cual se establecen mutuas interacciones (ecológicas, hidrológicas y sociales) y cuya fisiología debe ser entendida como la de un sistema complejo, sujeto al conocimiento de la dinámica de los “hidrosistemas” y sus relaciones con el clima, la hidroquímica, la hidrobiología, la ecotoxicología, la biología, la geología, la física, así como los procesos biológicos y sociales que tienen lugar en ella como el uso del territorio entre otros. Bajo estas premisas, el desafío de aplicar el enfoque ecohidrológico requiere pensar en términos interdisciplinarios, orientando el proceso de toma de decisiones en base a evidencia científica proveniente de ambos campos disciplinarios, complementado con las ciencias sociales y del comportamiento (Nestler et al. 2005).

Las estrategias más pertinentes para la gestión integrada de cuencas desde la perspectiva ecohidrológica son las siguientes: mitigación de riesgos; rehabilitación de ecosistemas; cogestión; desarrollo económico y desarrollo de capacidades. Su implementación deberá realizarse a través de los siguientes instrumentos: evaluación ecohidrológica de los recursos hídricos; ordenamiento territorial y uso del suelo; modelación ecohidrológica y sistemas soportes de decisión; monitoreo ecohidrológico; régimen de caudales ambientales; delimitación de zonas inundables y educación ambiental (Hannah et al. 2004).

Las alteraciones significativas de la calidad ambiental de las corrientes fluviales provocadas por las intervenciones humanas y el cambio climático amenazan la provisión de bienes ecológicos y servicios que prestan estos entornos acuáticos. Muchos países han comenzado a invertir recursos financieros y humanos para desarrollar herramientas científicas e ingenieriles dirigidas a la conservación y recuperación de los ecosistemas acuáticos. Este esfuerzo investigador ha promovido novedosos conceptos y métodos analíticos integrados en la nueva disciplina complementaria de la hidrobiología que es la ecohidrología.

Los paradigmas de esta reciente perspectiva rigen la comprensión actual de la ecología de los hidrosistemas lóticos y lénticos, que difieren en cuanto al dominio hidrológico estudiado, la escala espacial y temporal de aplicación y las aproximaciones analíticas (Folkard 2002). La utilización coordinada de las respectivas facetas ecológicas de la hidráulica y de la hidrología enriquece el conocimiento y la representación cuantitativa de las relaciones entre el movimiento del agua en una cuenca, el hábitat físico-químico, la biodiversidad y la funcionalidad del ecosistema acuático. El entendimiento mejorado de los procesos y condiciones que determinan la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas posibilita formular directrices científicas más consistentes para una gestión de los recursos hídricos verdaderamente integral (Nestler et al. 2005).

En el ámbito fluvial, se analiza holísticamente el efecto de la alteración del régimen de caudales en los procesos y condiciones ecosistémicas, en un contexto donde las respuestas de los organismos a las condiciones abióticas varían dinámicamente en el espacio y en el tiempo (Poff et al. 1997). Los dos procedimientos principales calculan un conjunto de índices hidrológicos que representan las características de la variabilidad de caudales con significación biológica: (1) los indicadores de alteración hidrológica y (2) la evaluación de la integridad hidroecológica (Folkard 2002), (Díez y Obregón 2008).

## **ESTRATEGIA DE INCORPORACIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES A LA GIRH**

La relación de proximidad, dependencia, reconocimiento de los valores ambientales y propiedad que las poblaciones y actividades económicas poseen de la red hidrográfica son factores de conflicto que las entidades gestoras deben gestionar con el objetivo de mitigar presiones y mejorar la calidad de los cursos de agua, compatibilizándolo siempre que sea posible con las utilidades pretendidas por los diversos actores.

Las obras estructurales para el control de crecidas y protección frente a éstas, por ejemplo, presas y embalses, diques o canalizaciones, pueden alterar los regímenes de flujo, modificar la forma del río o separar los cauces de sus planicies de inundación. De esa manera, tienden a dificultar los procesos ecológicos y morfológicos naturales y a simplificar demasiado el corredor fluvial, lo que resulta en un ecosistema homogéneo en el espacio, que no puede proporcionar características de hábitat variadas para que exista una diversa gama de especies. Por lo tanto, es importante mantener la estructura y función de los ecosistemas fluviales porque la mayoría de los servicios ecosistémicos suministrados por los corredores fluviales dependen de ellas y se pierden cuando se antropizan los ríos (Afonso y Coelho 2012).

Actualmente se reconoce que el funcionamiento natural e integral del sistema fluvial depende de una gran cantidad de variables, determinadas en gran medida por el régimen hidrológico, que modelan el hábitat de las especies y controlan los procesos ecosistémicos. El río ya no es entendido como un mero transportador de agua medida en término de caudales. Se asume la planicie de inundación como parte integral y estructural del río, y, por tanto, el régimen de crecidas y sequías se vuelve esencial. El paradigma del régimen hidrológico natural plantea que para que un río se mantenga sano, resiliente y productivo hay que manejarlo dentro de su rango de variabilidad hidrológica natural para sostener la biodiversidad y la integridad de los

ecosistemas acuáticos (Poff et al. 1997). En este sentido, no basta con fijar un único valor de caudal mínimo que debe ser mantenido en el río, sino que también debe considerarse su régimen de variación interanual e incluso espacial.

En este sentido, el régimen de caudales ambientales establece cuánto del régimen hidrológico natural de un río debería seguir fluyendo aguas abajo y hacia la planicie de inundación para mantener los valores característicos del ecosistema (Tharme 2003).

En un comienzo, la aplicación de caudales ambientales surgió por la necesidad de establecer límites de extracción de agua en ríos con el fin de que mantuvieran la capacidad de dilución y evitaran niveles de contaminación inadmisibles. Posteriormente se consideró la cantidad de agua que debía permanecer en los ríos para mantener poblaciones de peces de interés comercial (caudales ecológicos). Actualmente, también se busca conservar los servicios ecosistémicos, entendidos como los beneficios que proveen los ecosistemas a los seres humanos, contribuyendo a su bienestar. De esta manera, el concepto de caudales ambientales plantea específicamente el interés de sostener los ecosistemas y el bienestar humano que depende de estos.

Los caudales ambientales como herramienta de la GIRH aportan elementos para responder a algunas de las preguntas que surgen al abordar el uso sustentable de los recursos hídricos. Esta herramienta, además, contribuye a lograr las condiciones para generar una adecuada implementación de la normativa, debido a que requiere de acuerdos entre usuarios y de instancias de participación social. El desafío de determinar cuánto del régimen hidrológico puede ser alterado sin comprometer la salud y los servicios de los ecosistemas implica establecer límites de sustentabilidad en un marco de decisión tanto socio-político como científico (Tharme 2003), (UNESCO 2014).

A lo largo de estos últimos años, no han sido pocos los países que han desarrollado marcos jurídicos adecuados y pertinentes para incorporar el concepto de caudales ambientales a la gestión de los recursos hídricos nacionales y a aquellos compartidos con los países limítrofes. Del análisis de estas normativas, se puede apreciar que existe una marcada tendencia a regular los recursos hídricos desde una óptica territorial y ecosistémica desde una visión de la GIRH centrado en la regulación de los usos y el aprovechamiento, la calidad del recurso, y la función de la sociedad en la regulación y la gestión, entre otras. En este mismo sentido, son tenidas en cuenta las obligaciones mundiales y regionales asumidas por los países, a través de la ratificación de los tratados internacionales que regulan los recursos hídricos que se refieren al uso sustentable y a la conservación del agua y de los ambientes acuáticos, en los cuales la cuenca hidrográfica constituye la unidad de gestión para la GIRH.

Afonso y Coelho (2012) definen las funciones rectoras de la red hidrográfica y los principios de la gestión sostenible de los recursos hídricos, entre las que destacan:

1. *La función hidráulica.* Es generalmente la primera función reconocida por todos, permite drenar los excedentes que no infiltran o que no quedan retenidos en las áreas de influencia de las cuencas hidrográficas. No obstante, en esta función es necesario introducir el concepto de normal escorrentía de las aguas, relacionado intrínsecamente con la limitación física de los materiales y revestimientos que componen los lechos, taludes y márgenes de los cursos de agua.

2. *La función de ensanchamiento y encaje.* Intrínsecamente relacionada con la anterior, esta función se produce cuando los caudales exceden la capacidad hidráulica de los lechos, extravasando hacia las márgenes. Este fenómeno permite el almacenamiento temporal de importantes volúmenes de agua en tránsito y aliviar la capacidad hidráulica del lecho.
3. *La función ecológica.* Los lechos, taludes y márgenes constituyen hábitats y corredores únicos para la preservación de la biodiversidad y del equilibrio ecológico del territorio. En la planificación y gestión ambiental, es reconocida la enorme importancia ambiental de los corredores ribereños.
4. *La función reguladora de la temperatura y la luz.* La vegetación existente en los taludes y márgenes permite la regulación de la temperatura y condiciona la cantidad de luz que incide sobre las masas de agua. Existe una relación directa entre la calidad de las masas de agua y los factores abióticos temperatura y luz; por ejemplo, el oxígeno disuelto disminuye con el aumento de la temperatura, lo que propicia el inicio de procesos biológicos complejos que culminan generalmente con la muerte de peces, invertebrados y un mal estado ecológico de los medios acuáticos.
5. *La función de depuración de las aguas.* El fenómeno de bioretención de nutrientes y contaminantes aportado por los cursos de agua sucede cuando las aguas discurren por medios más o menos naturalizados, con bajas velocidades de escorrentía y abundante vegetación en los lechos. Esta función salvaguarda efectivamente los medios acuáticos de procesos de eutrofización.

Desde el punto de vista del estudio de los regímenes ambientales de un río, se deben identificar la significación de las utilidades extrínsecas (valores externos) e intrínsecas (valores ambientales) del sistema fluvial. Los primeros derivan de la concepción de río como un suministrador primordial del agua-recurso que precisa la sociedad para el abastecimiento humano (derecho fundamental) y para las diversas actividades económicas. Los valores ambientales sustentan la idea esencial del río como ecosistema que requiere una dotación hídrica suficiente para mantener unos usos fluviales pasivos cada vez más reclamados, los cuales se incluyen en las siguientes cuatro categorías amplias: ecológico, cultural, paisajístico y recreativo (Díez y Obregón 2008).

La incorporación del concepto de caudales ambientales en las políticas nacionales de aguas precisa de una estrategia que tome en cuenta el marco institucional y las capacidades nacionales existentes. Se deben identificar posibles ámbitos de aplicación y criterios de selección metodológica que estarán en función de los objetivos ambientales priorizados que se deseen mantener en cada caso, garantizando que su aplicación sea operativa.

Dada la alta dispersión y superposición de normativas y especialmente de instituciones involucradas en la gestión del agua, se hace necesario fortalecer las capacidades técnicas y de infraestructura, así como promover las alianzas y la coordinación interinstitucional. Es necesario impulsar programas de capacitación y de investigación en esta temática, que a su vez promuevan estrechar lazos entre investigación y gestión, para que la investigación aporte herramientas que contribuyan a las necesidades de gestión. Sin embargo, se plantea la necesidad de discutir si los caudales ambientales deberían estar definidos y regulados por dichas normativas o deberían ser considerados como una herramienta más de gestión (UNESCO 2014).

Las instancias participativas previstas en las normativas (comisiones o consejos de cuenca, por ejemplo) son relevantes para una adecuada aplicación y descentralización de dicha política. Sin embargo, sería necesario fortalecer las capacidades de ministerios, empresas públicas y entidades involucradas, para que puedan apoyar a las comisiones regionales y de cuenca con recursos humanos e infraestructura. A su vez, sería recomendable generar programas de fortalecimiento de las organizaciones y actores locales para que logren una adecuada participación en las diversas instancias.

Para la estimación de los caudales ambientales, debe tenerse en cuenta el objetivo ambiental que se plantee alcanzar y debería ser caso a caso, debido a la complejidad y diversidad de situaciones en donde podría ser útil aplicarlos. Por lo tanto, se propone una aproximación de tipo “caja de herramientas”, con la cual los especialistas puedan elegir las metodologías más adecuadas para el grado de conflictividad (presión de uso), disponibilidad de información, tiempos y costos económicos. A su vez, existe una amplia variedad de métodos de estimación que establecen límites muy distintos de flujo de caudal (como ocurre en los métodos hidrológicos), en todos los casos, la selección de la metodología será en función de las condiciones que se desea mantener o alcanzar en el sistema en cuestión. Por ejemplo, en situaciones con amplia variabilidad hidrológica, el método del régimen completo podría ser adecuado y en áreas protegidas donde hay un interés particular de conservación, un método ecohidráulico sería el más conveniente (UNESCO 2014).

La restauración del régimen de caudales, o el mantenimiento de unos niveles mínimos y el control de las fluctuaciones de forma que sean aceptables para los organismos acuáticos (simulación del régimen hidrológico natural), es una de las fases prioritarias en la restauración de cauces y riberas teniendo en cuenta que es el agua, en cantidad y calidad, y su movimiento, los pilares básicos sobre los que se asienta toda la estructura de un ecosistema fluvial (Poff et al. 1997).

En este sentido, la gestión integrada de corredores fluviales es un concepto holístico que involucra aspectos de ecohidrología fluvial, hidráulica, gestión integrada de cuencas y gestión de integrada de recursos hídricos, por lo cual debe analizarse y estudiarse desde un concepto más amplio que permita la visualización de problemas y soluciones desde aspectos físicos, sociales, económicos, políticos, culturales, recreativos, hidráulicos y ambientales a la hora de la planeación y el establecimiento de políticas de desarrollo de los corredores fluviales. Este modelo de enfoque exige que los hidrosistemas se evalúen en un todo (o en una extensión significativa) y no en tramos puntuales (Afonso y Coelho 2012).

La gestión integrada permite visualizar los corredores fluviales como un todo, pero no se puede descuidar las interrelaciones que el mismo sistema de manera natural genera, es decir no es posible desligar los aspectos bióticos del corredor con el uso antrópico que este mismo tenga, lo que lo convierte en sistemas complejos que necesitan un alto grado de análisis interdisciplinar involucrando a especialistas de áreas tan diversas como la hidráulica, ecología, biología, administración, etc. Por tanto, la rehabilitación de los ríos y riberas debe ser una aplicación multidisciplinaria de la hidrología y de la ecología fluvial, la cual se puede denominar ecohidrología fluvial (Afonso y Coelho 2012).

Los ríos son unidades vitales en el funcionamiento de las cuencas que, debido al transporte y a la circulación cíclica del agua, permiten la existencia de una gran biodiversidad. Poseen gran valor ecológico y ambiental dado su influencia sobre otros ecosistemas y los beneficios que proporcionan a la sociedad.

Sin embargo, casi todos los ríos del mundo presentan algún tipo de regulación, deterioro ambiental y contaminación, lo que empobrece la salud de estos ecosistemas acuáticos. Por tal motivo es que es necesario evaluar y monitorear su estado ecológico. Esto deberá hacerse a través de una metodología estándar, que se contemple dentro del marco legal del país y que considere aquellos componentes biológicos que están relacionados con los ríos, como es la vegetación ribereña.

Por esta razón es que se hace necesario y urgente proponer que en los documentos normativos relacionados con el agua, se considere la regulación de la vegetación ribereña, pues su influencia en el mantenimiento y en la rehabilitación del estado ecológico de los ríos es fundamental.

Se sugiere que estos instrumentos regulatorios contengan una sección de protección ambiental en la que se incluya a la vegetación ribereña como elemento clave para proteger, conservar y restaurar los ríos.

Asimismo, que la delimitación de dicha vegetación se apegue a las condiciones naturales de inundación del cauce, con una frecuencia de recurrencia determinada bajo estudios técnico-económicos, de acuerdo con la variabilidad del flujo. Además, su manejo debe tomar en cuenta la reforestación y el mantenimiento de especies vegetales endémicas de cada región.

Se debe garantizar también el mantenimiento y la rehabilitación de las franjas riparias que son unidades clave del estado ecológico de los ríos debido a que: 1) actúan como filtro de los sedimentos y de los contaminantes que son arrastrados por los escurrimientos que provienen de las zonas agrícolas, urbanas y rurales; 2) son la base de la cadena alimenticia de los sistemas acuáticos; 3) proveen sitios de resguardo y de reproducción para peces y otras especies acuáticas, condiciones que en conjunto propician un ambiente óptimo para su supervivencia y 4) influyen en el régimen hidrológico del agua superficial en la cuenca.

De esta forma dichos instrumentos normativos se tornarían más eficaces al procurar la cantidad y la calidad del agua de los ríos, pese a las actividades humanas. También, la ley introduciría una nueva percepción de los ríos, no sólo como portadores de agua sino como los primeros usuarios de dicho recurso ya que sostienen diversas formas de vida acuática y terrestre, a la vez que permiten el óptimo desarrollo de los ecosistemas que integran.

Es necesario fomentar la participación activa de los habitantes ribereños con programas de educación holística y de preferencia pragmática, con énfasis en la concientización local y global. La idea de estos programas sociales es que sirvan para combatir las causas con propuestas más integrales y prácticas sobre los riesgos de ignorar el estado ecológico de los ríos, donde cada uno es un caso particular.

## CONCLUSIONES

- A medida que el entendimiento sobre la ecohidrología sea ampliado, esta permitirá que los actores interactúen adecuadamente trayendo consigo mejores proposiciones de solución a los problemas enfrentados. Ha sido necesaria la definición detallada de un marco de acción de la ecohidrología, con el fin de establecer los criterios propios de la nueva práctica acorde con los tiempos actuales.
- Es importante destacar la necesidad del entendimiento de los principios de la ecohidrología, que conllevan a acciones más precisas y a tono con una nueva visión ecosistémica, profundizando en la ecohidráulica fluvial como una disciplina en formación. La ecohidrología fluvial avanzará cuando los fenómenos fluviales y su relación con el ambiente sean comprendidos mejor, y se tenga un mayor conocimiento de la función de los elementos naturales, y su representación, en la dinámica de los ríos.
- En este sentido, la planeación y establecimiento de políticas de desarrollo de los caudales ambientales, debe estribar de la sinergia de la GIRH, la gestión integrada de la cuenca y la ecohidrología fluvial.

## REFERENCIAS

- Afonso M. y Coelho P.** (2012). “Conservación y mantenimiento de cursos de agua. La perspectiva de la ARH” en Restauración y gestión ecológica fluvial: un manual de buenas prácticas de gestión de ríos y riberas, Capítulo 3. Mantenimiento y gestión (ed. Camprodon J., Ferreira M.T., Ordeix M.), ISBN 978-84-615-8853-4, Ed. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya e ISA Press, Lleida, España.
- Díez J. M. y Obregón N.** (2008). “Evaluación ecohidráulica multidimensional del hábitat acuático en la conservación de hidrosistemas fluviales”, Ingeniería y Universidad, 12 (2): 301-323, julio-diciembre, ISSN 0123-2126, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Folkard A. M.** (2002). “Fluvial flow-ecology interactions: ecohydrology & ecohydraulics”, Geography 361: Flows and Forms. 6b, Department of Geography, Lancaster University, Lancaster, England.
- Hannah D. M., Wood P. J. and Sadler J. P.** (2004). “Ecohydrology and hydroecology: a new paradigm?”, Hydrological Processes, 18:3439-3445, ISSN 0885-6087, Wiley Inter Science, Sussex, England.
- Nestler J. M., Goodwin R. A., Smith D. L. and Anderson J. J.** (2005). “A mathematical and conceptual framework for ecohydraulics” in Hydroecology and Ecohydrology: Past, Present, and Future, Chapter 12 (ed. Wood, P. J., Hannah D. M., and Sadler J. P.), ISBN 978-0-470-01017-4, Ed. John Wiley & Sons, Ltd., Sussex, England.

**Poff N. L., Allan J. D., Bain M. B., Karr J. R., Prestegard K. L., Richter B., Sparks R., and Stromberg J.** (1997). “The natural flow regime: a new paradigm for riverine conservation and restoration”. *BioScience*, 47:769-784, ISSN 0006-3568, Oxford Univ. Press, London, United Kingdom.

**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 Research and Applications*, 19: 397–441, ISSN 1535-1459, Wiley Inter Science, Washington D.C., United States of America.

**UNESCO** (2010). “La ecohidrología como desafío: experiencias y estudios de caso”, PHI-VII/ Documento Técnico N° 23, Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC), Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la UNESCO, ISBN 978-92-9089-148-2, Montevideo, Uruguay.

**UNESCO** (2012). “Seguridad hídrica: respuestas a los desafíos locales, regionales, y mundiales”, Programa Hidrológico Internacional (PHI) Octava Fase, Plan Estratégico, PHI-VIII 2014-2021, París, Francia.

**UNESCO** (2014). “Qué son los caudales ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay”, PHI-VIII/ Documento Técnico N° 34, Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC), ISBN 978-92-9089-194-9, Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la UNESCO, Montevideo, Uruguay.

**Zalewski M., Janauer G. A. and Jolankai G.** (1997). “Ecohydrology. A new paradigm for the sustainable use of aquatic resources”, UNESCO International Hydrological Programme (IHP), Technical Document in Hydrology N° 7, IHP-V Projects 2.3/2.4, Paris, France.

**Zalewski M.** (2002a). “Ecohydrology: the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources”, *Hydrological Science Journal*, 47 (5): 825-834, ISSN 0262-6667, London, England.

**Zalewski M.** (2002b). “Guidelines for the Integrated Management of the Watershed-Phytotechnology & Ecohydrology”, Series N° 5, Ed. United Nations Environment Programme Freshwater Management, ISBN 92-807-2059-7.