

## **Ecohidrología-Ecohidráulica: claves para la gestión integrada 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), Fac. de Ing. Civil, Univ. Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

Víctor Michel Villalejo García

email: [victory@hidro.cu](mailto:victory@hidro.cu)

Especialista Superior en Manejo y Desarrollo de los Recursos Hídricos, Direc.de Infraestructura Hidráulica, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), La Habana, Cuba.

### **RESUMEN**

La ecohidrología, nueva ciencia integradora que implica la investigación en la interfaz entre las ciencias hidrológicas y ecológicas, centrándose en la interacción entre hidrología y biota. La misma propone una nueva metodología de enfoque para una gestión sustentable del agua basada en evidencia científica proveniente de ambos campos disciplinarios. En tanto, la ecohidráulica como un subcampo de esta, estudia los vínculos entre los procesos físicos, las variables hidráulicas determinantes del hábitat acuático y las respuestas ecológicas del ecosistema fluvial ante perturbaciones naturales y/o antrópicas. La ecohidrología actúa como un factor de aceleración para la transición de la ecología descriptiva, la conservación restrictiva y la gestión excesiva de los ecosistemas acuáticos, hacia la ecología analítica/funcional y la gestión y conservación creativa de las aguas dulces con una visión holística.

**Palabras clave:** ecohidráulica, ecohidrología, gestión integrada, recursos hídricos.

## **Ecohydrology-Ecohydraulics: key concepts for the integrated management of water resources**

### **ABSTRACT**

Ecohydrology is a new integrating science that involves research at the interface between hydrological and ecological sciences, focusing on the interaction between hydrology and biota. It proposes a new approach methodology for sustainable water management based on scientific evidence from both disciplinary fields. Meanwhile, ecohydraulic as a subfield of this, which studies the links between physical processes, the hydraulic variables that determine the aquatic habitat and the ecological responses of the fluvial ecosystem to natural and/or anthropogenic disturbances. Ecohydrology acts as an acceleration factor for the transition from descriptive ecology, restrictive conservation and excessive management of aquatic ecosystems, towards analytical/functional ecology and the management and creative conservation of freshwater with a holistic vision.

**Keywords:** ecohydraulics, ecohydrology, integrated management, water resources.

## **INTRODUCCIÓN**

El mundo está cambiando. Las sociedades están cambiando. El medio ambiente natural está cambiando, el planeta está cambiando y el ciclo hidrológico y la estacionalidad de las variables hidrológicas lo hacen con él. En consecuencia, es necesario adaptar y validar los instrumentos utilizados en el presente para el manejo hidrológico y de los recursos hídricos. Dentro de este contexto, debe utilizarse un nuevo enfoque de socio-ecosistema basado en los principios de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), para afrontar los desafíos presentes y futuros en cuanto al manejo de recursos hídricos. Habrá que considerar un nuevo cambio de paradigma, para lo que se requiere de una nueva generación de gestores y decisores.

La GIRH promueve un enfoque integrado y multidisciplinario para el manejo de los recursos hídricos. Este nuevo enfoque de gestión, ha evolucionado hasta convertirse en un concepto holístico e incluyente, incorporando la dimensión social y ambiental, con el propósito de mejorar el manejo y la gobernanza del recurso agua.

Las alteraciones significativas de la calidad ambiental de las corrientes fluviales provocadas por las intervenciones antrópicas y el cambio climático son ampliamente conocidas, y amenazan la provisión de bienes ecológicos y servicios ecosistémicos 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 dos disciplinas complementarias de la hidrobiología: la ecohidrología y la ecohidráulica.

La teoría ecohidrológica se basa en la regulación de 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 de los recursos hídricos, la biodiversidad, los servicios ambientales que brindan los ecosistemas acuáticos para la sociedad y el aumento de la resiliencia ante las crecientes formas de impacto debido al cambio climático (WWAP 2018).

La ecohidrología es una nueva interdisciplina que relaciona la hidrología con la ecología y los complejos procesos en el ciclo hidrológico. Esos procesos ocurren generalmente dentro de sistemas acuáticos (ríos, lagos, aguas subterráneas) y también en los sistemas terrestres (transpiración y los balances energéticos termodinámicos en la superficie terrestre). En los sistemas acuáticos, la ecohidrología busca entender la regulación dual entre los procesos hidrológicos y los ecológicos. Así con este nuevo enfoque hidrobiológico, 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 (Zalewski et al. 1997).

## **ECOHIDROLOGÍA**

El concepto de ecohidrología fue desarrollado en el marco del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO inspirado en las conclusiones de la Conferencia Internacional sobre Agua y Medioambiente de Dublín en 1992, reconocida mundialmente por los principios que allí se adoptaron para la gestión integrada de los recursos hídricos, (Zalewski 2002). 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. Surge de esta manera la ecohidrología, como una nueva ciencia multidisciplinaria, cuyo origen etimológico consiste en la fusión de los términos hidrología y ecología, y propone precisamente un nuevo enfoque para la gestión sustentable y de largo plazo de los recursos hídricos.

Zalewski et al. (1997) definen 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.

La ecohidrología considera las interrelaciones funcionales entre la hidrología, los procesos involucrados en un ecosistema y su biota, dirigidas al manejo equilibrado de los ecosistemas en general. 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 (UNESCO 2010).

La ecohidrología 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 una cuenca hidrográfica
2. Amplificar la capacidad de carga y resiliencia de los ecosistemas frente a la presión antrópica
3. Usar las propiedades de los ecosistemas como herramientas de gestión del agua (ingeniería ecológica-soluciones basadas en la naturaleza (SbN)).

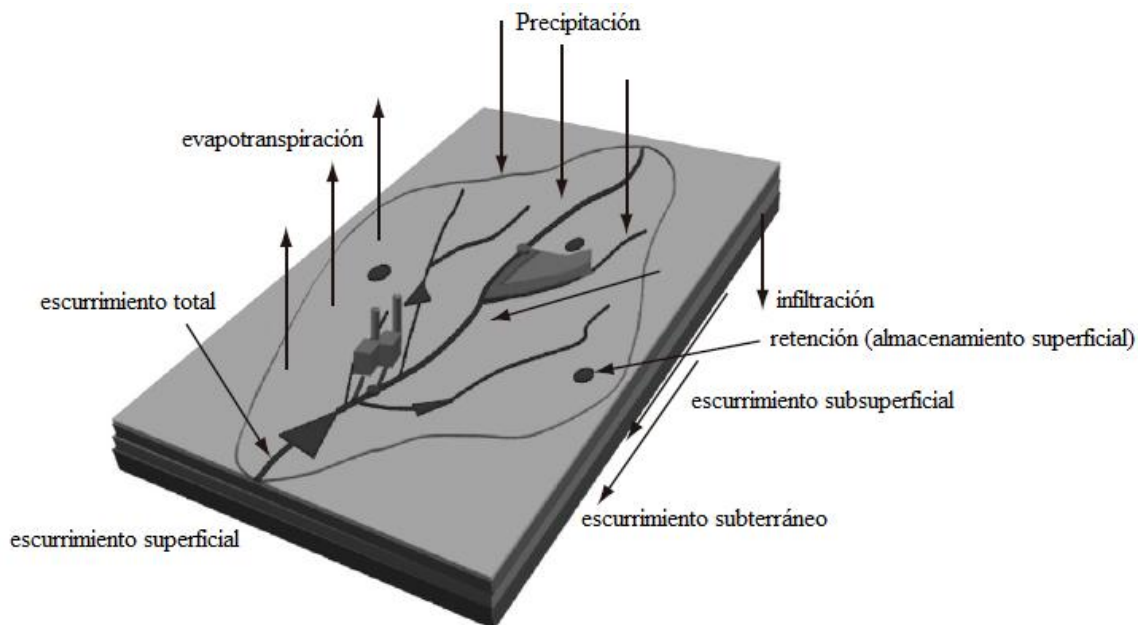
Su aplicación implica una regulación dual de los ecosistemas mediante la cual: los procesos hidrológicos generalmente regulan los ecosistemas; la manipulación de los ecosistemas puede convertirse en un instrumento para la regulación de los procesos hidrológicos y, a su vez, ambas regulaciones se integran con dos infraestructuras hidráulico-técnicas para crear una nueva ingeniería ecológica que permita alcanzar finalmente una gestión sustentable de los recursos hídricos y el mantenimiento de los servicios ambientales provistos por los ecosistemas (IAHS 2001).

Este enfoque fue adoptado por el Programa Hidrológico Internacional 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 (Zalewski 2002).

Según Zalewski (2010), el progreso del desarrollo del concepto de ecohidrología implicó la formulación de sus principios expresados en tres componentes secuenciales:

1. *Hidrológico*: Definición del marco institucional, técnico y ecológico para trabajar. La cuantificación del ciclo hidrológico en una cuenca, puede ser un referente para una integración funcional de los procesos hidrológicos y biológicos. Integración de cuenca, agua y su biota en una entidad, incluyendo: escala, dinámica y jerarquía de factores (ver figura 1)

2. *Ecológico*: Definición de los objetivos de trabajo. La integración de los procesos en las cuencas de los ríos puede ser encaminada de manera que aumente la capacidad de transporte de la cuenca y mejore su servicio en al ecosistema. Es crucial la comprensión de la evolución y establecimiento de los procesos ecohidrológicos para un enfoque proactivo hacia el manejo sustentable (ver figura 2)
3. *Ingeniería ecotecnológica*: Definición de la metodología de trabajo. La ecohidrología usa las propiedades de los ecosistemas como una herramienta para su manejo integrado (soluciones basadas en la naturaleza (SbN)). La regulación de los procesos ecológicos e hidrológicos, basados en un acercamiento a un sistema integrado, es en efecto, una nueva herramienta para la gestión integrada de las cuencas hidrográficas (ver figura 3).

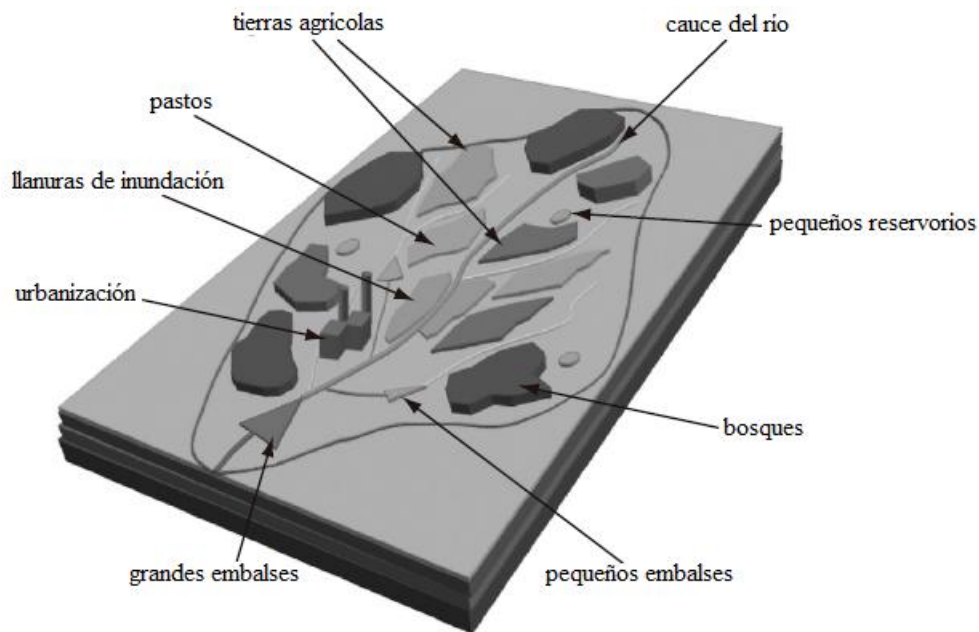


**Figura 1. Primer Principio: Hidrológico. Cuantificación de análisis del ciclo hidrológico desde el punto de vista socioeconómico. Economía y dinámica espacial-temporal vs. diversas formas de impacto humano** (fuente: Zalewski 2010, adaptado del original por los autores).

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

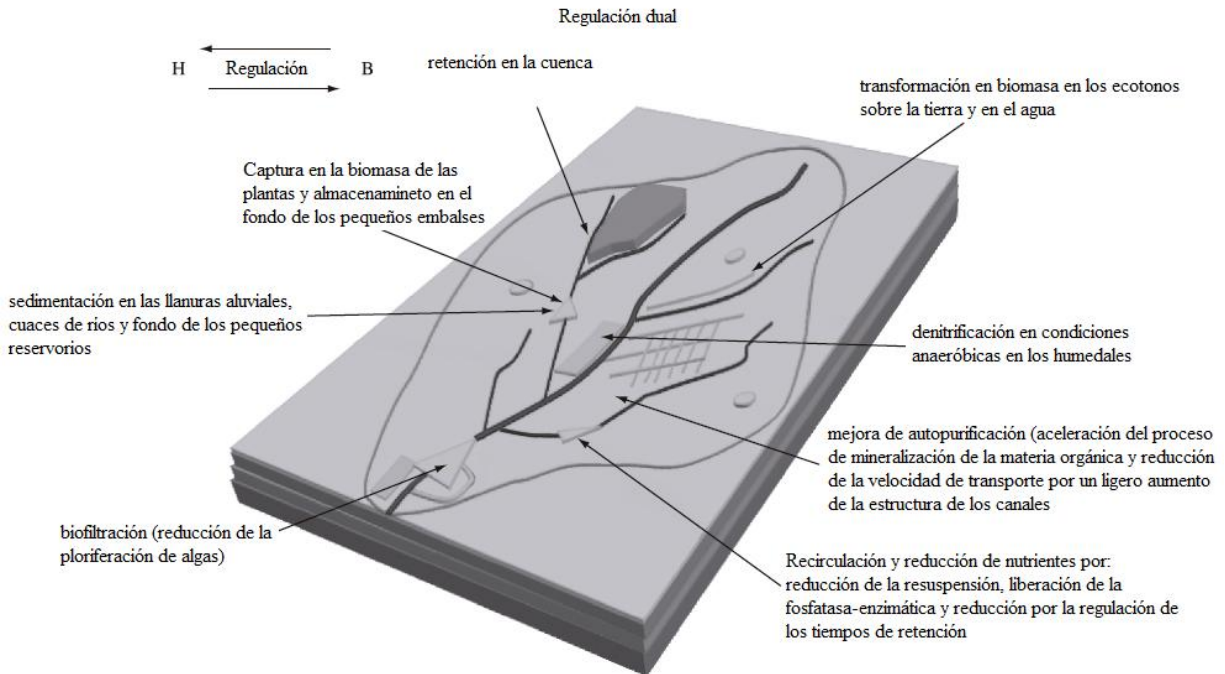
1. Para lograr un entendimiento profundo del régimen hidrológico y de la distribución de la biota en corredores fluviales en el presente, deben ser analizados e interpretados los cambios históricos naturales y antropogénicos en la cuenca
2. Mejoramiento de la resiliencia incide en la recuperación y amortiguamiento de los corredores fluviales
3. La vulnerabilidad de los ríos, embalses y estuarios depende de los patrones estacionales de procesos hidrológicos y bióticos y pueden ser cambiados 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 avenidas son modificadas por las características biológicas de los 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 los Sistemas de Información Geográfica (SIGs) 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 modelación de la cuenca. La integración de esta información dentro de los 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 de los sistemas hídricos y de los paisajes
10. La optimización de la estructura de las zonas de ecotonos (ej.: zonas de defensa ribereñas y 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.



**Figura 2. Segundo Principio: Ecológico. El análisis de distribución de varios tipos de biocenosis y su potencial para mejorar la resiliencia y la capacidad de absorción de los impactos humanos** (fuente: Zalewski 2010, adaptado del original).





**Figura 3. Tercer Principio: Ecohidrológico. Uso de la biota para controlar los procesos hidrológicos y viceversa, utilizando la hidrología para regular la biota** (fuente: Zalewski 2010, adaptado del original).

## ECOHIDRAULICA

La ecohidráulica es un subcampo de la ecohidrología que estudia la relación entre un cuerpo de agua y las comunidades alrededor de este. Los principales avances en este campo hasta el momento han estado bajo la forma de curvas de preferencia de hábitats que mostraban las preferencias de diversas especies de macroinvertebrados, peces, reptiles, anfibios, vegetación riparia, etc., en términos de la velocidad del agua, profundidad, tipo del sustrato y cobertura (Folkard 2002).

La ecohidráulica estudia los vínculos entre los procesos físicos y las respuestas ecológicas en ríos, estuarios y humedales. Su faceta fluvial establece un marco analítico local con alta resolución del hábitat físico generado en un tramo de río. Surgió en Estados Unidos para definir las condiciones de hábitat vinculadas a la subsistencia de la ictiofauna salmonícola residente en los ríos regulados (Hannah et al. 2004).

Por su parte Nestler et al. (2005) definen la ecohidráulica como una disciplina integrada que honra las convenciones y las tradiciones de los ecólogos y de los ingenieros hidráulicos. Se reconoce que las dos disciplinas son componentes de la ingeniería y de la ecología y que tienen diversos conceptos y acercamientos, centradas, cada una, en ciertas gamas limitadas de los procesos sobre rangos limitados de escalas. Por lo que se debe creer que estas diferencias se pueden minimizar dentro de los marcos de referencia dominantes usados por cada una de las dos disciplinas que la componen.

Esto ha conllevado a unir a la visión del hidrólogo, la perspectiva biológica de los ríos y su entorno. La aplicación directa de los principios de la ecohidrología en cuanto al medio fluvial (ingeniería fluvial), da paso a la ecohidrología fluvial o ecohidráulica fluvial, lo que ha llevado a un mayor entendimiento de la ecohidrología fluvial, como el vínculo de las disciplinas ecológicas y fluviales en el marco del corredor fluvial, para realizar un manejo sustentable del mismo, haciendo énfasis en su preservación estructural y su funcionalidad (Nestler et al. 2005).

Las ideas que sostienen la ecohidráulica se pueden remontar a dos principios separados, uno centrado en la ingeniería hidráulica y el otro centrado en ecología. Los ecólogos en el ámbito académico tienen una larga historia de estudio de la relación entre el flujo de un fluido y la respuesta ecológica. Por su parte, los ingenieros hidráulicos primero procuraron sistemáticamente incluir la respuesta de los organismos en su trabajo durante los esfuerzos para desarrollar los criterios del diseño de las instalaciones del paso de los peces en las presas (Nestler et al. 2005).

Su premisa consiste en que el mapa de la distribución espacial del hábitat hidráulico en un segmento fluvial posibilita evaluar la disponibilidad del hábitat utilizable para los organismos, objetivo cuyas preferencias son conocidas. Este planteamiento ecológico de la hidráulica fluvial ofrece a los técnicos unos procedimientos analíticos valiosos para generar las recomendaciones defendibles que serán cada vez más escrutadas en el contexto de la conservación de ríos (Folkard 2002).

Una de las aplicaciones inmediatas de la ecohidráulica es la determinación de los caudales ecológicos y ambientales para un sistema dulceacuícola. Su implementación se establece en los llamados métodos de simulación de hábitat, hidrobiológicos o ecohidráulicos. Estas metodologías recomiendan trabajar con especies de referencia (peces, invertebrados acuáticos, microalgas del sustrato, vegetación riparia y acuática, etc.) o comunidades bióticas de referencias agrupadas en gremios -especies del sitio que utilizan un mismo recurso y/o el mismo hábitat (columna de agua, zona litoral y fondo)- teniendo en cuenta los diferentes estadios biológicos de la(s) especie(s) (reproducción y freza, semilla, larva, alevín, reclutamiento, juvenil y adulto) (IAHS 2001), (Hannah et al. 2004).

El futuro de estas metodologías de simulación de hábitat va encaminado a la utilización de índices de preferencia de hábitat que integren diferentes comunidades biológicas de referencia. Para lograr esto se requiere avanzar sobre el conocimiento de uso del hábitat de forma integral por dichas comunidades biológicas, poco desarrollado en general a nivel mundial. Para construir las llamadas curvas de preferencia de hábitat es necesario recabar información de estudios previos y nuevas investigaciones sobre la abundancia (cantidad por especie) y composición (tipos de especies) de las especies o comunidad de interés vinculadas a las variables hidráulicas y morfológicas claves (profundidad, velocidad de agua, tipo de sustrato, etc.) (Maddock et al. 2013).

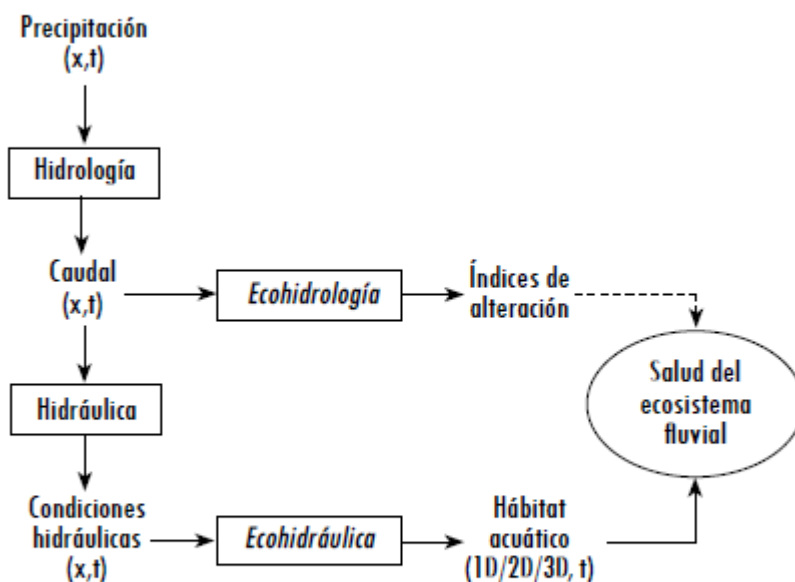
Otras relaciones se han desarrollado al registrar las preferencias de los microorganismos para diversas condiciones hidráulicas. La tercera área en la cual la ecohidráulica ha sido acertada consiste en relacionar la distribución acuática de los macrófitos con las condiciones del flujo (Folkard 2002).

Por lo anterior se puede definir la ecohidráulica fluvial, como la disciplina que se encarga del estudio hidráulico y ecológico del río y su interrelación con los ecosistemas dentro del corredor fluvial con un marcado énfasis ambiental, con el propósito de sostener un equilibrio en la biodiversidad, cantidad y calidad del agua en el sistema río-corredor fluvial (Poff et al. 1997).

### La ecohidráulica como herramienta para la conservación de los ecosistemas acuáticos

El logro de los objetivos medioambientales en la conservación y recuperación de los ecosistemas acuáticos se manifiesta, cuantifica y valora en términos de estado ecológico. Por ello es esencial disponer de unos métodos que correlacionen la ocurrencia de caudales y de conformaciones del cauce con determinadas funciones biológicas y que estén enfocados en el diseño e implementación de medidas de intervención. La capacidad de la ecohidráulica para el diagnóstico ambiental y su complementariedad con la ecohidrología se manifiestan en las conexiones y transformaciones existentes entre los eventos de flujo y el estado de la biota (Hannah et al. 2004).

El régimen de caudales de un río, por ejemplo, depende inicialmente de la precipitación incidente en su cuenca hidrográfica, magnitud que varía tanto espacial ( $x$ ) como temporalmente ( $t$ ). Los procesos hidrológicos determinados por las características de la cuenca transforman la precipitación en el régimen de caudales, cuya cantidad y calidad varían también bidimensionalmente dentro del dominio de drenaje natural de la cuenca. Las características del cauce rigen los procesos hidráulicos que convierten los caudales en condiciones hidráulicas locales, que varían temporalmente ( $t$ ) y espacialmente ( $x$ ), con dimensiones espaciales que serán determinadas por el esquema numérico de solución del flujo que se decida utilizar (1D, 2D y 3D) (Díez y Obregón 2008) (ver figura 4).



**Figura 4. Transformaciones y relaciones entre la precipitación y el estado ecológico del sistema fluvial** (fuente: Díez y Obregón 2008)

Nota: Las líneas continuas corresponden a relaciones causales mientras que la discontinua indica una presuposición operativa.



La biota fluvial reacciona directamente a las condiciones del microambiente hidráulico e indirectamente al régimen de caudales, por lo cual una conceptualización hidrobiológica cabal debe incorporar todos los procesos involucrados en las transformaciones anteriores. En consecuencia, la evaluación integral de los efectos ligados a una intervención humana precisa el manejo coordinado de las técnicas ecohidráulicas y ecohidrológicas (Maddock et al. 2013).

La naturaleza comprensiva de la ecohidrología se cimienta en la motivación de calcular unos índices de la alteración hidrológica provocada por una perturbación concreta, que se correlacionan descriptivamente con un determinado estado ambiental del ecosistema fluvial. Por su parte, los ecohidráulicos poseen una visión aparentemente reduccionista (dominio limitado), pero en realidad sus bases conceptuales incluyen unas funciones hidrobiológicas consistentes que explican las relaciones entre el caudal y el hábitat acuático de un modo causal, más allá de una simple descripción empírica (Díez y Obregón 2008).

Como la percepción básica del ambiente hidráulico que desarrollan los organismos está determinada comúnmente por las variables profundidad, velocidad y material del lecho, la ecohidráulica constituye el marco analítico elemental para la conservación de hidrosistemas fluviales, que se complementa adecuadamente con las consideraciones ecohidrológicas (Maddock et al. 2013).

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

La Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, con sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), ha reflejado esto en la adopción de la Meta 6.6: “proteger y restaurar los ecosistemas acuáticos, incluyendo montañas, bosques, humedales, ríos, acuíferos y lagos para el 2020”, a fin de apoyar el logro del ODS 6: “garantizar la disponibilidad y gestión sostenible de agua y saneamiento para todos”, incluidos sus otros objetivos sobre agua potable, saneamiento, calidad del agua, eficiencia en el uso del agua y gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) (UNESCO 2012).

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. 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 2012).

Los paradigmas de estas recientes perspectivas 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. 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 (Poff et al. 1997).

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 con base en evidencia científica proveniente de ambos campos disciplinarios, complementado con las ciencias sociales y del comportamiento (Zalewski 2002), (WWAP 2018).

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. 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).

El Programa Hidrológico Internacional (PHI) en su 8<sup>va</sup> Fase (2014-2021) define en su Plan Estratégico: “Seguridad hídrica: respuesta a los desafíos locales, regionales y mundiales”, la Tarea N° 5: “Ecohidrología: creación de armonía para un mundo sustentable” que establece las siguientes áreas focales con sus respectivos objetivos específicos (UNESCO 2012):

1. Dimensión hidrológica de una cuenca-identificar riesgos potenciales y oportunidades para el desarrollo sustentable
2. Conformación de la estructura ecológica de la cuenca para posible mejoramiento del ecosistema-productividad biológica y biodiversidad
3. Soluciones de sistema ecohidrológico e ingeniería ecológica para el mejoramiento de la resiliencia hidrológica y ecosistémica y de los servicios ecosistémicos
4. Ecohidrología urbana-purificación de agua de lluvia y retención en el entorno urbano, potencial para mejoramiento de la salud y calidad de vida
5. Normatividad ecohidrológica para sostener y restaurar la conectividad entre el área continental y las áreas costeras y el funcionamiento ecosistémico.

### **Área Focal N° 1. Dimensión hidrológica de una cuenca: identificar riesgos potenciales y oportunidades para el desarrollo sustentable**

La cuantificación e integración de los procesos hidrológicos y biológicos a escala de cuenca se basa en el supuesto de que los factores abióticos son de primera importancia y se vuelven estables y predecibles cuando las interacciones bióticas comienzan a manifestarse. La cuantificación abarca los elementos clave del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración), los patrones de los pulsos hidrológicos a lo largo del continuum del río y el monitoreo de las fuentes de contaminación puntuales y no puntuales, erosión y degradación del hábitat. La integración de la información sobre los aportes del ciclo hidrológico y la distribución

económica proporcionan un patrón de regulación de procesos dirigidos al uso sustentable de los recursos hídricos y medioambientales.

#### *Objetivos Específicos*

- Incrementar el conocimiento base y seguir desarrollando enfoques para la reducción de amenazas como inundaciones y sequías, reivindicando el carácter estocástico de los procesos hidrológicos en cuencas, mediante la armonización de la infraestructura hidrotécnica con la distribución y el manejo de ecosistemas retenedores de agua
- Apoyar la investigación y el desarrollo de directrices para incorporar la comprensión del pasado en los Planes de Manejo de Cuencas Hidrográficas (ej.: paleohidrología, patrones de sucesión ecológica, dinámicas espacio-temporales de asentamientos humanos)
- Promover un modelo de desarrollo para reducir los niveles máximos de agua mediante la integración de conocimiento específico de ciencias ambientales (ej.: hidrogeología, suelo, aguas subterráneas, cubierta vegetal) y las características de las zonas de inundación
- Desarrollar sistemas ecohidrológicos de alarma temprana a nivel de cuenca (mediante la integración de biomonitoreo molecular, hidroquímica, geomorfología, cobertura y uso de suelo en un marco de empleo de sistemas de información geográfica).

### **Área Focal N° 2. Conformación de la estructura ecológica de la cuenca para posible mejoramiento del ecosistema-productividad biológica y biodiversidad**

El concepto surge como una respuesta eco-hidrológica basada en el supuesto de que en el marco de cambios globales intensivos no es suficiente proteger a los ecosistemas en contra de la creciente población humana, consumo de energía y materiales y la creciente inestabilidad climática. Es necesario regular la estructura de los ecosistemas novedosos (modificados por el ser humano), así como los procesos (sistemas de apoyo a la vida) que buscan aumentar “capacidad de conducción” (calidad del agua, restauración de la biodiversidad, servicios del ecosistema para la sociedad, resiliencia del ecosistema fluvial).

#### *Objetivos Específicos*

- Mejorar la comprensión del papel de los distintos tipos de ecosistemas terrestres y de humedales distribuidos en cuencas en los procesos del ciclo hidrológico
- Apoyar el estudio sobre el papel que desempeñan la hidrodinámica y la estructura biológica de cuenca hidrográfica en la reducción de distintos tipos de contaminación en sitios de demostración
- Desarrollar métodos para mitigar el impacto de la demografía en la cuenca y el efecto de la estructura socioeconómica en el equilibrio de nutrientes y contaminantes en el agua de las corrientes fluviales
- Potenciar y compartir el conocimiento sobre la integración de tecnologías eco-hidrológicas con buenas prácticas agrícolas/ambientales para la reducción de contaminación difusa proveniente del terreno.

### **Área Focal N° 3. Soluciones de sistema ecohidrológico e ingeniería ecológica para el mejoramiento de la resiliencia hidrológica y ecosistémica y de los servicios ecosistémicos**

El uso de propiedades del ecosistema como una herramienta de gestión se basa en los principios primero y segundo de la ecohidrología relacionados con la ingeniería ecológica. La aplicación del aprendizaje social y la metodología de la comunicación sirven para la

armonización de las prioridades de la sociedad con conocimiento experto y logros recientes de la ciencia, y conjuntamente contribuyen a un desarrollo sustentable basado en una capacidad de conducción mejorada del ecosistema y de los servicios del ecosistema.

Los cambios globales progresivos y el incremento en la demanda de un manejo más sustentable y eficiente enfocado en necesidades sociales cambiantes y el contexto, la identificación y evaluación, así como la incorporación funcional de servicios del ecosistema como elemento integral del manejo y la economía de los recursos hídricos, el abasto sustentable de agua y los modelos de demanda son una necesidad. Existe la necesidad de cambiar la percepción de los sistemas ecológicos en modelos económicos, que vaya de “costos obligatorios” a “beneficios potenciales”.

Tanto en el terreno agrícola como en el espacio urbano, es necesario desarrollar biotecnologías ecohidrológicas (basadas en una “regulación dual”) con el fin de incrementar la disponibilidad de agua y la productividad de alimentos/bioenergía, reducir las emisiones difusas de contaminantes, mejorar la biodiversidad y servir a la salud humana y calidad de vida mediante el desarrollo de un sistema enfocado hacia la regulación de la complejidad de interacciones entre el ciclo hidrológico, ecosistemas y sociedades.

#### *Objetivos Específicos*

- Identificar buenas prácticas para aplicar “doble regulación” para la reducción del exceso de nutrientes y contaminantes mediante la regulación de la interacción biota-hidrología
- Desarrollar directrices para la integración de diversos tipos de regulaciones biológicas e hidrológicas a nivel de la cuenca, con el fin de conseguir una sinergia para mejorar la calidad del agua, la biodiversidad y recursos de agua dulce, así como optimizar los servicios del ecosistema
- Desarrollar estudios de caso relativos a la armonización de medidas eco-hidrológicas con las soluciones hidrotécnicas actuales o planificadas (represas, sistemas de riego, plantas de tratamiento de aguas residuales, etc.) para reducir el florecimiento de algas tóxicas y adaptación a la inestabilidad climática
- Promover tecnología ecohidrológica de punta y de bajo costo para la GIRH y la evaluación de servicios ecosistémicos a nivel de cuenca y desarrollar instrumentos para su incorporación eficiente en Planes de Manejo de Cuencas Hidrográficas.

#### **Área Focal N° 4. Ecohidrología urbana-purificación de agua de lluvia y retención en el entorno urbano, potencial para mejoramiento de la salud y calidad de vida**

Las poblaciones urbanas exigen grandes demandas de recursos y servicios para vivir, incluyendo agua, lo cual se convierte en una de las mayores causas de la crisis hidrológica mundial. La dinámica de expansión espacial de las ciudades se caracteriza por manchones altamente diversificados de desarrollo urbano y “ecosistemas novedosos” que impactan la sustentabilidad de las ciudades. En consecuencia, la calidad de vida y la salud humanas son de la mayor prioridad para el desarrollo de ciudades sustentables, de ahí la necesidad de un nuevo paradigma de manejo holístico de las ciudades. En términos del ciclo hidrológico, uno de los mayores impactos es el manejo del escurrimiento.

Sin embargo, es posible lograr un cambio en las áreas urbanas en cuanto a la percepción del manejo de agua pluvial mediante la aplicación de mejores prácticas de gestión y, más recientemente, de biotecnologías ecohidrológicas para la retención de agua pluvial y su potabilización. La consideración de mejorar la retención del agua de lluvia purificada en “áreas verdes” del plan espacial de la ciudad resulta en un amigable “paisaje urbano azul-verde”, con un consumo de energía reducido, transferencia y acumulación de contaminantes, así como mejoras en la salud humana y en los valores estéticos y culturales.

#### *Objetivos Específicos*

- Identificar y promover buenas prácticas para la reducción de los niveles máximos del agua de lluvia urbana mediante el desarrollo de sistemas de infiltración, potabilización y retención del agua de lluvia
- Desarrollar directrices para una planificación urbana sustentable, basada en combinación del diseño urbano sensible hacia el agua, así como en las biotecnologías ecohidrológicas para mejorar la calidad de vida, la economía de los sistemas urbanos y la adaptación a las variaciones climáticas mundiales
- Desarrollar y fortalecer marcos y mejorar metodologías para la cooperación en plataformas que incluyan la participación de las múltiples partes interesadas y del público para la demanda de investigación y aplicación eficiente de los recientes avances en ecohidrología para la GIRH.

#### **Área Focal N° 5. Normatividad ecohidrológica para sostener y restaurar la conectividad entre el área continental y las áreas costeras y el funcionamiento ecosistémico**

Las presiones de origen humano en las áreas costeras son extremadamente altas, no hay duda. El ochenta por ciento de la contaminación marina proviene de fuentes ubicadas en la parte continental y, en el mundo en desarrollo, más del 90 % del drenaje y el 70 % de los desechos industriales se vierten sin tratamiento en las aguas superficiales, donde contaminan los aprovisionamientos de agua y las aguas costeras con consecuencias dañinas para la biodiversidad, la salud humana y los servicios ecosistémicos costeros. Para 2025 se estima que el 75 % de la población mundial (6 300 millones de personas), vivirán en las zonas costeras, lo que naturalmente incrementará las presiones sobre los recursos hídricos y reducirá su sustentabilidad. Además, el cambio global ya afecta los ecosistemas costeros tanto en tierra (ej.: cambios en los ciclos hidrológicos y patrones de precipitación) como en los océanos (ej.: cambios en los niveles del mar). De ahí la necesidad urgente de abordar estos impactos y el interés por aplicar enfoques ecohidrológicos que contribuyan a soluciones sustentables.

#### *Objetivos Específicos*

- Intercambiar y mejorar soluciones ecohidrológicas regionales para el impacto que los cambios globales tienen sobre los ciclos hidrológicos y sistemas costeros, y responder así a la creciente vulnerabilidad de los recursos acuáticos.
- Desarrollar enfoques y métodos para una regulación dual de la gestión, -hidrología y biota-, en cuencas hidrográficas, con el fin de mejorar la calidad del agua y la biodiversidad en los ecosistemas costeros.
- Mejorar la comprensión de los sistemas costeros como receptores de aguas residuales vertidas aguas arriba, y desarrollar estudios de caso sobre cómo las soluciones

ecohidrológicas podrían contribuir a reducir el riesgo de diversas enfermedades que se presentan en las zonas del estuario.

## CONCLUSIONES

- 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 como una nueva ciencia multidisciplinaria, cuyo origen etimológico surge de la fusión de los términos hidrología y ecología, que propone precisamente un nuevo enfoque para la gestión sustentable y de largo plazo de los recursos hídricos.
- 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 subrayar la necesidad del entendimiento de los principios de la ecohidrología, que conllevan a acciones más precisas y a tono con una nueva visión, profundizando en la ecohidráulica fluvial como una disciplina en formación.
- La ecohidrología ha dado una dimensión adicional a la gestión del agua en las cuencas hidrográficas. Esta consiste, que como paradigma es un proceso del pensamiento que permite una sinergia con la complementariedad de varios sectores de la investigación.
- La ecohidrología y la ecohidráulica como una subcampo de esta, es una ciencia integradora que se centra en la interacción entre la hidrología y la biota. Busca reforzar los servicios ecosistémicos en los paisajes modificados en las cuencas hidrográficas para reducir los impactos antropogénicos. Los enfoques holísticos que manejan la hidrología y la biota pretenden lograr la sostenibilidad tanto en los ecosistemas como en las poblaciones humanas y mejorar la GIRH.

## REFERENCIAS

- 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.
- IAHS** (2001). “Hydro-Ecology: Linking Hydrology and Aquatic Ecology”, International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication N° 266, Ed. IAHS Press, ISBN 1-901502-41-4, Centre for Ecology and Hydrology, Oxfordshire, United Kingdom.



- Maddock I., Harby A., Kemp P. and Wood P.** (2013). “Ecohydraulics: an integrated approach”, Ed. John Wiley & Sons, Ltd., ISBN 978-0-470-97600-5, New Jersey, USA.
- 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.
- 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.
- WWAP** (2018). “Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua”, Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos/ONU-Agua, ISBN 978-92-3-300083-4, Org. de Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), París, Francia.
- 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.** (2002). “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.** (2010). “Ecohydrology for compensation of Global Change”, *Brazilian Journal of Biology*, 70 (5): 689-695, ISSN 1519-6984, Belo Horizonte-Minas Gerais, Brasil.