

Invest Agrar: Sist Recur For (2006) Fuera de serie, 153-165

El régimen natural de caudales: una diversidad imprescindible, una diversidad predecible

C. Martínez Santa-María* y J. A. Fernández Yuste

UD Hidráulica e Hidrología. EUIT Forestal. UPM. Ciudad Universitaria, s/n. 28040 Madrid. España

Resumen

En los últimos años la comunidad científica ha puesto de manifiesto la importancia del régimen de caudales como elemento vertebrador del ecosistema fluvial, estableciendo el denominado «paradigma del régimen natural de caudales». A la luz de este paradigma, cualquier valoración de la integridad de un ecosistema fluvial debe incluir necesariamente un análisis objetivo de la alteración de su régimen de caudales. De hecho, la Directiva Marco del Agua establece el régimen hidrológico como uno de los elementos a considerar en la caracterización del estado ecológico de nuestros ríos.

La metodología que se presenta en este trabajo permite: 1) definir el estatus hidrológico de referencia y 2) valorar la alteración del régimen de caudales, mediante 24 índices que evalúan la distorsión que en términos hidrológicos supone un determinado régimen frente al natural. Por último, se exponen los resultados de la aplicación de esta metodología al embalse de El Vado, ubicado en la cabecera del río Jarama e integrante del sistema de abastecimiento de agua a Madrid.

Palabras clave: alteración hidrológica, régimen de caudales, ecosistemas fluviales.

Abstract

Natural flow regime: a necessary diversity, a predictable diversity

During last years the scientific community has realized flow regime importance as a connexion and explaining element of the fluvial ecosystem. Related to this paradigm, flow regime alteration analysis is necessary for the evaluation of environmental integrity. The objective is to show a new tool for characterizing stream flow regimes, quantifying hydrologic impacts caused by dam construction.

To reach this objective, this paper proposes: 1) to establish reference conditions and 2) evaluation of hydrological alteration: with 24 alteration indexes of alteration to measure the altered regime distortion against the natural. They have been applied to Vado reservoir situated in the upper reach of Jarama river which is integrated in Madrid water supply system.

Key words: hydrologic alteration, flow regime, fluvial ecosystems.

Introducción

En los últimos años la manera de mirar a nuestros ríos ha cambiado radicalmente (Naiman *et al.*, 2002). Ciudadanos, gestores, y el propio legislador, han asumido una realidad a la que se le venía dando la espalda: la gestión de los recursos hídricos en todas sus dimensiones —sociales, políticas, técnicas y económicas—, debe estar supeditada al mantenimiento de la funcionalidad ambiental del río como ecosistema y como parte esencial del macrosistema ambiental de las comarcas por las que discurre.

Hoy, asumido ese principio, sólo queda llevarlo a la práctica. Y en ese contexto crucial es en el que nos encontramos. No es fácil dar ese paso que lleva de la aceptación de la realidad vital del río a su implementación real día a día, porque...

— Ese asentamiento conceptual puede atenuarse, o incluso desvanecerse, cuando se manifiestan las repercusiones reales que tal aceptación implica.

— Son muchos los intereses sociales y económicos que pueden resultar intensamente perturbados.

— Ante este nuevo reto de buscar una conciliación entre el uso de los recursos hídricos y la conservación de la vida que sustentan, no hay todavía un cuerpo doctrinal, una experiencia acreditada, una solución única que se pueda presentar como referente o patrón de actuación.

* Autor para la correspondencia: carolina.martinez@upm.es
Recibido: 19-04-06; Aceptado: 26-10-06.

El verdadero problema está en cómo los agentes implicados en las tomas de decisiones respecto a la gestión de los recursos hídricos, pueden tener una estimación razonablemente objetiva y veraz de lo que sus decisiones pueden implicar sobre la dimensión ambiental del río.

El objetivo de esta comunicación es dar a conocer una nueva «herramienta» que permite evaluar la integridad del régimen de caudales de los ríos, analizando los aspectos del régimen que en mayor medida determinan la composición, estructura y funcionalidad del ecosistema fluvial.

Conviene advertir al lector que lo que a continuación encontrará es, fundamentalmente, un marco de reflexión, un planteamiento conceptual del protocolo que se ha seguido para desarrollar la «herramienta», junto con una ilustración de su aplicabilidad que presenta los resultados obtenidos en el estudio del tramo inmediato aguas abajo de la presa de «El Vado». La limitación de espacio no permite presentar con el detalle necesario la formulación de cada uno de los índices que conforman el protocolo; el lector interesado puede encontrar esos pormenores en «Índices de alteración hidrológica en ecosistemas fluviales» (Martínez y Fernández Yuste, 2006).

Para cubrir el objetivo planteado, ha parecido oportuno desarrollar el contenido de esta comunicación articulándolo en torno a epígrafes formulados como preguntas: ¿Por qué evaluar la alteración del régimen de caudales en los ríos? ¿Qué es necesario evaluar? ¿Cómo evaluar esa alteración? ¿Qué se aporta con este trabajo? ¿Para qué puede ser útil?

¿Por qué evaluar la alteración del régimen de caudales en los ríos?

Se puede contestar a esta pregunta considerando dos puntos de vista: el científico y el legal.

Desde el punto de vista legal, es necesario evaluar la alteración del régimen de caudales porque así lo establece la Directiva Marco del Agua (DMA). Esta Directiva plantea como objetivo prioritario que la gestión de los recursos hídricos debe salvaguardar el buen estado ecológico de los ecosistemas vinculados. Para alcanzar este objetivo es necesario disponer de protocolos que permitan calificar de manera objetiva y eficiente el estado ecológico de los ríos, y la DMA, en su anejo V, recoge una serie de componentes del ecosistema fluvial que necesariamente deben

considerarse para valorar su estado ecológico. Entre esos elementos, se cita expresamente el régimen hidrológico.

Desde una óptica científica, la trascendencia del régimen de caudales como elemento articulador y vertebrador del ecosistema fluvial ha tenido un reconocimiento relativamente reciente, alcanzando su cenit con la formulación del paradigma del régimen natural de caudales: «*el rango completo de variación intra e inter-anual del régimen hidrológico con sus características asociadas de estacionalidad, duración, frecuencia y tasa de cambio, son críticas para sustentar la biodiversidad natural y la integridad de los ecosistemas acuáticos*» (Poff *et al.*, 1997) (Fig. 1). El corolario de este axioma es inmediato: el éxito en la conservación de la biodiversidad y funcionalidad de nuestros ríos depende de nuestra capacidad de proteger o restaurar los principales aspectos del régimen natural de caudales (RNC) (Richter *et al.*, 1998; Arthington, 1997; Bunn y Arthington, 2002) y de conocer cómo las variables hidrológicas e hidráulicas interactúan con los procesos biológicos controlando la composición en especies y la funcionalidad de los distintos componentes del ecosistema.

¿Qué es necesario evaluar?

También para contestar a esta pregunta conviene referirse a los aspectos legales y científicos, que en este caso son concurrentes.

La DMA establece que la caracterización del estado ecológico debe plantearse mediante la comparación de la situación que se quiere analizar con una denominada «de referencia». Para cada uno de los elementos a considerar —régimen hidrológico; macroinvertebrados; fitobentos; ictiofauna...— se debe:

1. Definir las variables a medir en atención a su capacidad para reflejar la integridad ambiental del elemento analizado.
2. Establecer el estado de referencia, esto es, los valores que esas variables tomarían para unas condiciones de mínima alteración del ecosistema fluvial.
3. Calcular los Ecological Quality Ratios (EQR) (CIS-WFD, 2003) como cociente entre el valor de la variable para las condiciones actuales y el que le corresponde en el estado de referencia.

En el ámbito científico los procedimientos recomendados para este tipo de caracterizaciones, habitualmente englobados bajo la denominación genérica

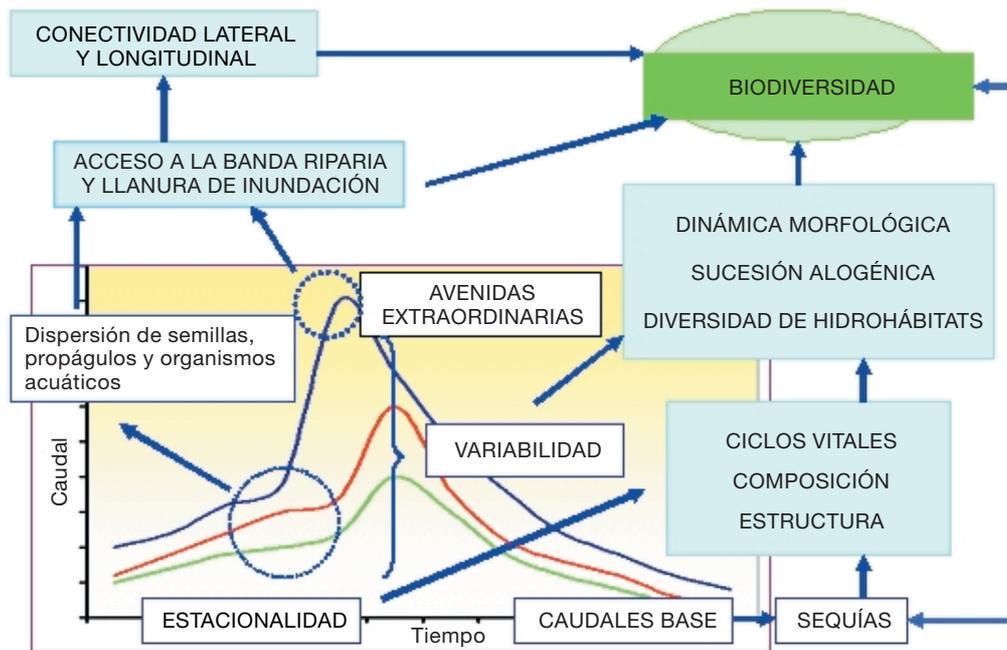


Figura 1. Paradigma del régimen natural de caudales (basado en Arthington, 1997). La figura representa el hidrograma natural de un río para un año húmedo (en azul), medio (en rojo) y seco (en verde). Sobre este esquema se han remarcado algunos componentes y aspectos del régimen con significación ambiental (avenidas extraordinarias, caudales base, sequías, estacionalidad y variabilidad) y el papel principal de cada uno de ellos en el mantenimiento de la biodiversidad.

de evaluación de la integridad ambiental (Stribling *et al.*, 1998; Barbour *et al.*, 1999) proponen protocolos similares. En nuestro país, y en el caso concreto de la DMA, se han desarrollado recientemente esfuerzos muy importantes en este sentido y merece destacarse los protocolos elaborados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (2005) y la Agencia Catalana del Agua (2006), aunque en ninguno de los dos casos se ha abordado la actualización de los índices para la caracterización del régimen hidrológico.

¿Cómo evaluar?

Es a partir de este punto donde se presentan las aportaciones tangibles de este trabajo. Antes de mostrar el protocolo propuesto conviene hacer notar que se ha intentado contestar a esta cuestión teniendo como referentes los principios de significación y eficiencia. Significación, de manera que las variables seleccionadas para caracterizar el régimen fuesen representativas de las características con mayor trascendencia ambiental. Eficiencia, de tal forma que se evitasen redundancias en la información aportada y

que permitiesen optimizar la información hidrológica habitualmente disponible.

La metodología propuesta para la evaluación de la alteración hidrológica puede esquematizarse en dos fases principales: En la primera de las fases, FASE A, se realiza la caracterización del régimen natural de caudales, esto es, la definición del estado de referencia, para a continuación, en la FASE B, llevar a cabo la evaluación de la alteración hidrológica. La Figura 2 resume las etapas constitutivas de cada fase:

¿Cómo caracterizar el régimen natural de caudales? (Fase A)

A1. Seleccionar los aspectos del régimen de caudales con mayor significación ambiental

Esta etapa tiene por objetivo la elección de aquellos aspectos del régimen de caudales que estén fuertemente vinculados con componentes, procesos y dinámica del ecosistema fluvial. La comunidad científica ofrece una opinión generalizada en la selección de la magnitud, frecuencia, estacionalidad, duración y tasas

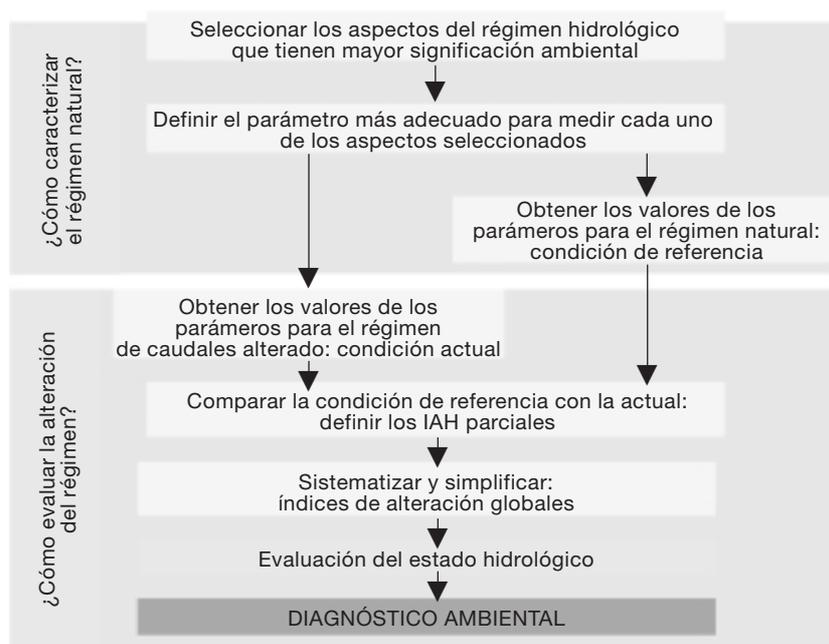


Figura 2. Fases de la metodología para la evaluación del estado hidrológico.

de cambio del régimen natural como los aspectos con mayor significación ambiental (Poff *et al.*, 1997; Richter *et al.*, 1998; Arthington 1997). En este trabajo se propone el estudio de estos aspectos a nivel de valores habituales y valores extremos del régimen, según se recoge en la Tabla 1.

A2. *Definir el parámetro más adecuado para medir cada uno de los aspectos seleccionados*

El proceso de caracterización se completa mediante la selección de los parámetros más adecuados para evaluar de forma clara y precisa cada uno de los aspectos anteriores. La Tabla 1 recoge el total de parámetros seleccionados. Una definición más completa de cada uno de ellos, junto con el proceso de cálculo a seguir para su estimación, se recoge en Martínez y Fernández Yuste, 2006.

En ciertas ocasiones, debido a la diversidad tanto en el tiempo como en el espacio del aspecto a estudiar, se hace necesario asignar varios parámetros que cubran esta multiplicidad. Este es el caso, por ejemplo, de la magnitud de los caudales máximos, donde es necesario definir cuatro parámetros que evalúen la magnitud y frecuencia de las avenidas a cuatro niveles distintos, dado que cada nivel tiene una significación ambiental muy concreta (conformación del cauce, co-

nexión con la llanura de inundación y dinámica riparia, limpieza del sustrato, etc.).

A3. *Obtener los valores de los parámetros para el régimen natural de caudales: condición de referencia*

La condición de referencia queda totalmente definida al obtener el valor de los parámetros para el régimen natural. Se necesitan para este análisis las series de aportaciones mensuales y de caudales medios diarios más extensas posible en dicho régimen, recomendándose un período mínimo de 15 años consecutivos de modo que se recoja la variabilidad interanual.

¿Cómo evaluar la alteración en el régimen natural de caudales? (Fase B)

B1. *Obtener los valores de los parámetros para el régimen alterado: condición actual*

El régimen alterado o cualquier otro régimen pueden ser igualmente caracterizado mediante los parámetros recogidos en la Tabla 1. Los datos necesarios (aportaciones mensuales y caudales medios diarios) deben corresponder a series coetáneas a las empleadas para el régimen natural.

Tabla 1. Componentes del régimen de caudales, principales aspectos con significación ambiental y parámetros propuestos para su caracterización

Componente del régimen natural	Aspecto	Parámetro
Valores habituales		
Valores anuales y mensuales	— Magnitud	— Media de las aportaciones anuales
	— Variabilidad	— Diferencia entre aportación mensual máxima y mínima en el año
	— Estacionalidad	— Mes de máxima y mínima aportación del año
Valores diarios o a intervalos horarios	— Variabilidad	— Diferencia entre los caudales medios diarios correspondientes a los percentiles de excedencia del 10% y 90% en la curva de caudales diarios clasificados
	— Fluctuación intradía	— Suma de las fluctuaciones diarias
Valores extremos		
Valores máximos (avenidas)	— Magnitud y frecuencia	— Media de los máximos caudales diarios anuales
		— Caudal Generador del Lecho (estimado con el QMCO según CEDEX)
		— Caudal de conectividad
		— Caudal correspondiente a la avenida habitual (percentil de excedencia del 5% en la curva de caudales diarios clasificados)
	— Variabilidad	— Coeficiente de variación de la serie de máximos caudales diarios anuales
— Estacionalidad	— Coeficiente de variación de la serie de avenidas habituales	
— Duración	— Número medio de días al mes con caudal medio diario > Q5%	
— Tasas de crecida y defluencia	— Máximo número de días consecutivos con caudal medio diario > Q5%	
Valores mínimos (sequías)	— Magnitud y frecuencia	— Máximas tasas relativas en crecida y defluencia
		— Media de los mínimos caudales diarios anuales
	— Variabilidad	— Caudal correspondiente a la sequía habitual (percentil de excedencia del 95% en la curva de caudales diarios clasificados)
		— Coeficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales
		— Coeficiente de variación de la serie de sequías habituales
— Estacionalidad	— Número medio de días al mes con caudal medio diario < Q95%	
— Duración	— Máximo número de días consecutivos con caudal medio diario < Q95%	
		— Número medio de días al año con caudal diario nulo

B2. *Comparar la condición de referencia con la actual: Definición de los Índices de Alteración Hidrológica (IAH) parciales*

Conceptualmente los IAH propuestos se definen como cociente entre el valor del parámetro de caracterización en un régimen y el valor de ese mismo parámetro

en régimen natural, en concordancia con las recomendaciones de CIS-WFD (2003) referente a los EQR. En algunos casos, en los que las características de los parámetros no permiten construir el correspondiente índice como cociente, se han propuesto procedimientos alternativos, aunque siempre respetando que el rango de variación del índice sea entre 0 (máxima alteración) y 1

(alteración nula). Se han definido un total de 24 índices — I_1 a I_{24} —, de los cuales, 7 índices caracterizan los valores habituales, 9 los valores extremos máximos y 8 los valores extremos mínimos. La relación de estos índices se recoge en la Tabla 2. Como ya se ha señalado, todos los índices propuestos están acotados entre 0 y 1. Se han estudiado también las soluciones a adoptar ante posibles indeterminaciones (denominador igual a 0) o situaciones en las que el índice tome un valor superior a 1.

B3. *Obtener los IA H parciales*

Conocidos el valor de los respectivos parámetros en régimen natural y alterado se obtienen los 24 índices de alteración hidrológica parciales.

B4. *Sistematizar y simplificar: obtener los índices de alteración global (IAG)*

Una vez calculados los índices, es necesario obtener una cuantificación global que aglutine los resultados de los índices relativos a cada componente del régimen de caudales. Existirán por consiguiente tres índices globales: índice de alteración global sobre valores habituales, IAG_H , obtenido a partir de los índices de alteración I_1 a I_7 ; índice de alteración global sobre avenidas, IAG_A , obtenido a partir de los índices de alteración I_8 a I_{16} ; índice de alteración global sobre sequías, IAG_S , obtenido a partir de los índices de alteración I_{17} a I_{24} . Para explicar el cálculo del IAG nos apoyamos en la Figura 3. En ella se han representado los valores de los IA H obtenidos para la situación natural

Tabla 2. Índices de alteración hidrológica (AH)

Aspecto	Índice	Denominación
Valores habituales		
Magnitud	I_1	Magnitud de las aportaciones anuales
	I_2	Magnitud de las aportaciones mensuales
Variabilidad	I_3	Variabilidad habitual
	I_4	Variabilidad extrema
	I_5	Variabilidad por fluctuación diaria
Estacionalidad	I_6	Estacionalidad de máximos
	I_7	Estacionalidad de mínimos
Valores extremos máximos: avenidas		
Magnitud y frecuencia	I_8	Magnitud de las avenidas máximas
	I_9	Magnitud del caudal generador del lecho
	I_{10}	Magnitud del caudal de conectividad
	I_{11}	Magnitud de las avenidas habituales
Variabilidad	I_{12}	Variabilidad de las avenidas máximas
	I_{13}	Variabilidad de las avenidas habituales
Estacionalidad	I_{14}	Estacionalidad de avenidas
Duración	I_{15}	Duración de avenidas
Estacionalidad y duración	I_{16}	Estacionalidad y duración de avenidas
Valores extremos mínimos: sequías		
Magnitud y frecuencia	I_{17}	Magnitud de las sequías extremas
	I_{18}	Magnitud de las sequías habituales
Variabilidad	I_{19}	Variabilidad de las sequías extremas
	I_{20}	Variabilidad de las sequías habituales
Estacionalidad	I_{21}	Estacionalidad de sequías
Duración	I_{22}	Duración de sequías
	I_{23}	N.º de días con caudal no nulo
Estacionalidad y duración	I_{24}	Estacionalidad y duración de sequías

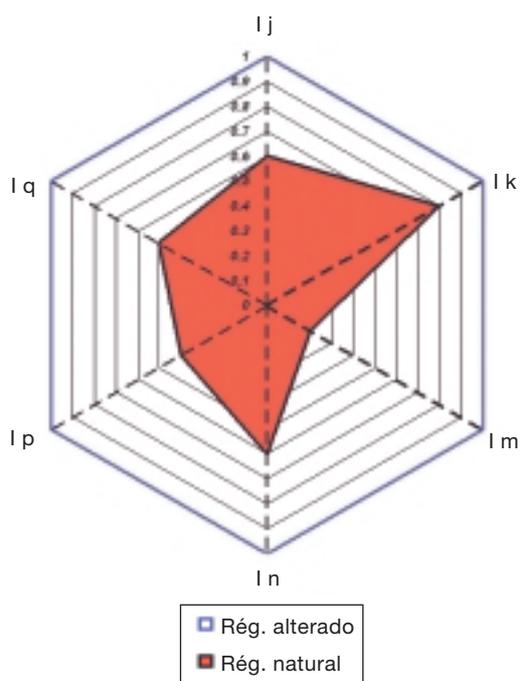


Figura 3. Cálculo del índice de alteración global (IAG) a partir de los índices parciales (IAH).

(con todos los índices igual a 1) y la situación alterada. La alteración global se asimila al cociente entre la superficie definida por el polígono delimitado por los valores de los índices en la situación alterada y la natural: $IAG = (\text{área IAH rég. alterado})/(\text{área IAH rég. natural})$

Pueden extrapolarse a los IAG los comentarios realizados para los IAH respecto a rango de variación e interpretación.

B5. Evaluación del estado hidrológico

Con el objetivo de ofrecer una valoración no sólo cuantitativa sino también cualitativa del grado de alteración se proponen cinco niveles o estados de alteración hidrológica, denominados estatus hidrológicos, definidos siguiendo las recomendaciones respecto a niveles y asignación de colores recogida en CIS-WFD, (2003) para la clasificación del denominado estatus ecológico a partir de los EQR. Adoptando una distribución lineal de las cinco clases propuestas entre 0 y 1, la Tabla 3 resume los criterios de representación y asignación de los diferentes estatus de los índices parciales.

Respecto a los índices de alteración global, y teniendo en cuenta la relación cuadrática existente entre IAH e IAG — $IAG = f(IAH^2)$ —, se obtendrían los siguiente criterios de representación y asignación (Tabla 4).

Aplicación de los IAH al embalse de El Vado

La metodología expuesta en los epígrafes anteriores se ha aplicado al embalse de El Vado, ubicado en la cabecera del río Jarama e integrante del sistema de abastecimiento de agua a Madrid. Esta aplicación permite valorar la alteración que la gestión del embalse ha supuesto en el régimen de caudales.

Los datos utilizados en la estimación de la alteración corresponden a aportaciones mensuales (31 años) y registros diarios de caudales (15 años) tanto en régimen alterado (vertidos por la presa) como en régi-

Tabla 3. Código de colores y valores correspondientes a los índices de alteración parciales (IAH) para los diferentes estatus hidrológicos

Estatus hidrológico: índices parciales (IAH)				
1	2	3	4	5
Excelente $0,8 < IAH \leq 1$	Bueno $0,6 < IAH \leq 0,8$	Moderado $0,4 < IAH \leq 0,6$	Deficiente $0,2 < IAH \leq 0,4$	Muy deficiente $0 \leq IAH \leq 0,2$

Tabla 4. Código de colores y valores correspondientes a los índices de alteración globales (IAG) para los diferentes estatus hidrológicos

Estatus hidrológico: índices globales (IAG)				
1	2	3	4	5
Excelente $0,64 < IAG \leq 1$	Bueno $0,36 < IAG \leq 0,64$	Moderado $0,16 < IAG \leq 0,36$	Deficiente $0,04 < IAG \leq 0,16$	Muy deficiente $0 \leq IAG \leq 0,04$

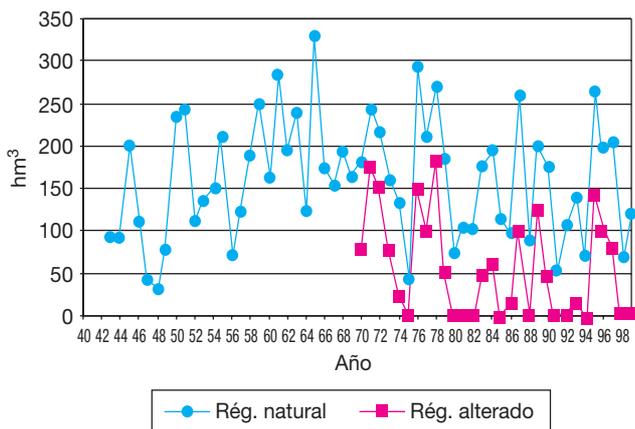


Figura 4. Aportaciones anuales (hm^3) en régimen natural (1944/45-199/00) y alterado (190/71-1999/00).

men natural (aportaciones al embalse). La Figura 4 muestra las diferencias en aportaciones anuales entre los regímenes natural y alterado para el período utilizado en el cálculo de los IAH: 1970/71- 2000/2001.

En la Figura 5 se recogen las diferencias respecto al número medio de días al mes con caudal inferior a $0,350 \text{ m}^3/\text{s}$, (caudal correspondiente al percentil de excedencia del 95% en la curva de caudales diarios clasificados, y que ha sido utilizado como umbral por debajo del cual se puede hablar, para este tramo y según la caracterización realizada, de «día seco»).

Los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta se recogen en la Tabla 5. La interpretación completa de estos resultados escapa del objetivo de esta comunicación y del espacio disponible; además del

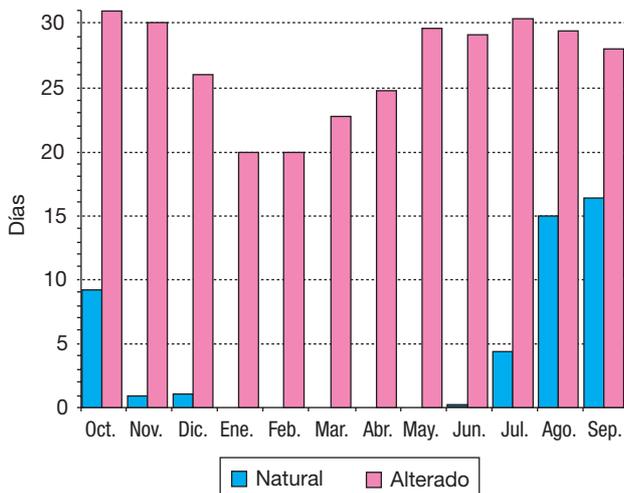


Figura 5. Diferencias entre el régimen natural y alterado respecto al número medio de días secos en cada mes ($Q < 0,350 \text{ m}^3/\text{s}$).

análisis de los valores de los distintos índices desde una óptica hidrológica, es necesario vincularlos con su significación en los componentes, procesos y dinámica del ecosistema fluvial y para ello estudiar la integridad de algunos de los componentes básicos del ecosistema como por ejemplo los invertebrados bentónicos, la ictiofauna o la hidromorfología. De nuevo se remite al lector interesado a Martínez y Fernández Yuste (2006) para allí poder comprobar el alcance de la interpretación hidro-ambiental de los IAH para el caso de «El Vado».

A continuación se presentan unas breves consideraciones relativas a los IAG:

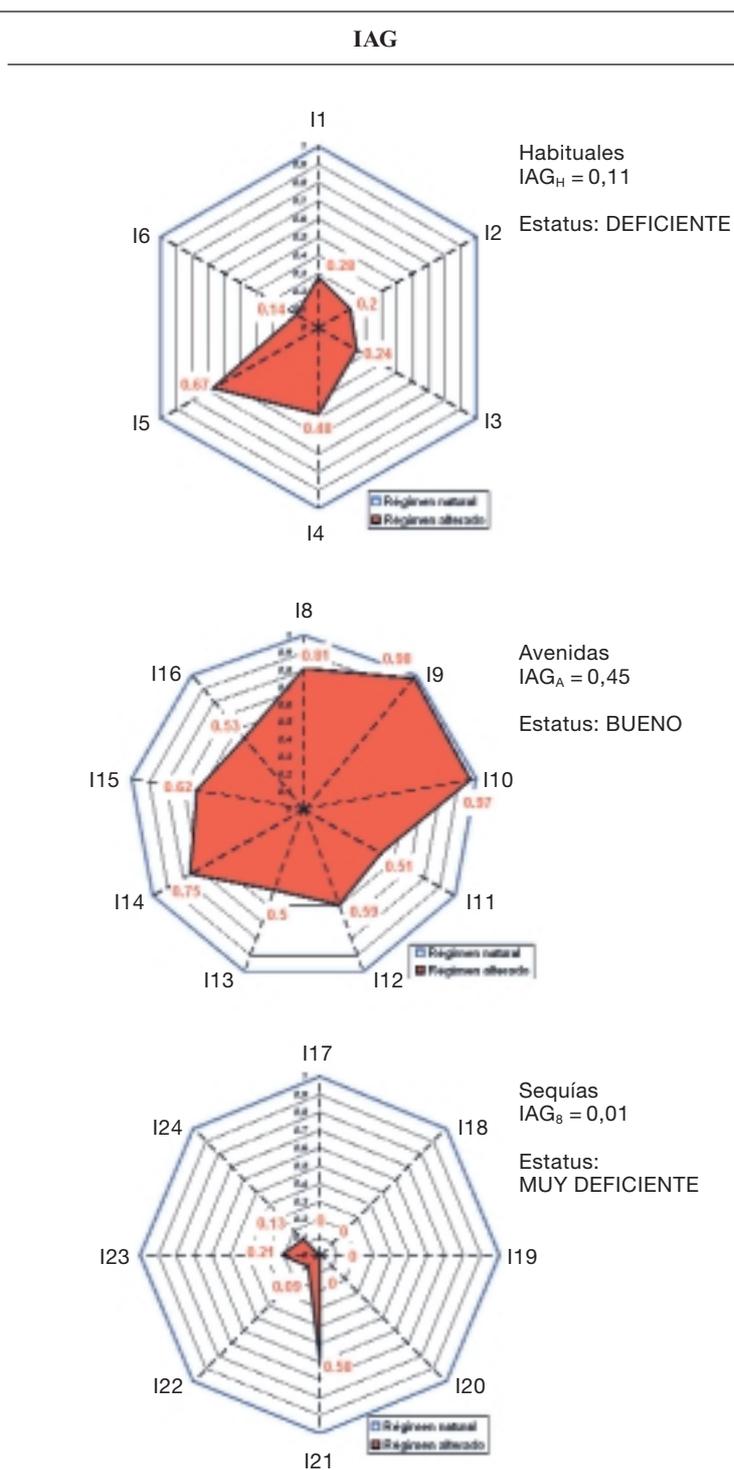
El valor del índice global de **valores habituales** $\text{IAG}_H = 0,11$ define un estatus hidrológico DEFICIENTE. El régimen de explotación del embalse en el período analizado conlleva una reducción considerable en la magnitud y variabilidad de las aportaciones tanto anuales como mensuales, que siendo leves o moderadas en años de condiciones húmedas o medias, alcanza sin embargo niveles críticos en los años más secos donde se agravan igualmente las diferencias estacionales con respecto al régimen natural.

La valoración final sobre **avenidas** concluye en un índice global $\text{IAG}_A = 0,45$ correspondiente a un estatus hidrológico BUENO. Para interpretar este resultado conviene recordar que la capacidad del embalse es aproximadamente la tercera parte de la aportación media anual y que las condiciones de explotación hacen que salvo en los meses de verano se mantenga un nivel de embalse relativamente alto para así atender la garantía de suministro a la red del Canal de Isabel II. Con estas condiciones, la capacidad de laminación de avenidas es limitada y no es descabellado plantear la hipótesis de que la presencia del embalse no afecta sensiblemente a los caudales de avenida. Los resultados obtenidos permiten refrendar esa hipótesis, pues ponen de manifiesto que tanto la magnitud de los caudales máximos, como su estacionalidad y duración, no se han visto prácticamente afectadas. Si se han visto ligeramente alteradas las avenidas de pequeña magnitud, que se corresponden a las que presentan un caudal máximo comprendido entre el caudal correspondiente al percentil de excedencia del 5% en la curva de caudales diarios clasificados y el caudal generador del lecho, que como ya se ha señalado se asume corresponde con el de la máxima crecida ordinaria.

— El valor obtenido $\text{IAG}_S = 0,01$ clasifica en un estatus MUY DEFICIENTE la situación global respecto a **sequías**. En el régimen alterado, las sequías se extreman

Tabla 5. Índices de alteración hidrológica y estatus hidrológico para el embalse de El Vado

Aspecto	IAH	
	Valor	Cualidad
<i>Valores habituales</i>		
Magnitud	$I_1 = 0,28$	[Orange]
	$I_2 = 0,20$	
Variabilidad	$I_3 = 0,24$	[Yellow]
	$I_4 = 0,48$	
Estacionalidad	$I_6 = 0,67$	[Green]
	$I_7 = 0,14$	
<i>Avenidas</i>		
Magnitud	$I_8 = 0,81$	[Blue]
	$I_9 = 0,98$	
	$I_{10} = 0,97$	
	$I_{11} = 0,51$	
Variabilidad	$I_{12} = 0,59$	[Yellow]
	$I_{13} = 0,5$	
Estacionalidad	$I_{14} = 0,75$	[Green]
Duración	$I_{15} = 0,62$	[Green]
Estac. y durac.	$I_{16} = 0,53$	[Yellow]
<i>Sequías</i>		
Magnitud	$I_{17} = 0$	[Red]
	$I_{18} = 0$	
Variabilidad	$I_{19} = 0$	[Red]
	$I_{20} = 0$	
Estacionalidad	$I_{21} = 0,58$	[Yellow]
Duración	$I_{22} = 0,09$	[Red]
	$I_{23} = 0,21$	
Estac. y durac.	$I_{24} = 0,13$	[Red]



Excelente
 $0,8 < I \leq 1$

Bueno
 $0,6 < I \leq 0,8$

Moderado
 $0,4 < I \leq 0,6$

Deficiente
 $0,2 < I \leq 0,4$

Muy deficiente
 $0 < I \leq 0,2$



en magnitud y se agravan en duración, habiéndose alterado fuertemente su pauta estacional. A ello se suma la persistencia continuada y con valores alarmantes de días con caudal nulo, inexistentes en régimen natural: la afección al régimen natural de sequías es extrema.

¿Qué aporta este trabajo?

Para enmarcar las aportaciones de este trabajo se ha procedido a realizar un estudio comparativo entre lo expuesto en los epígrafes precedentes y los denominados *Indicators of Hydrologic Alteration* (IHA) propuestos por Richter *et al.*¹ (Richter *et al.*, 1996; 1998), y complementados por el mismo autor en 2005 con los denominados *Environmental Flow Component* (EFC).

Este análisis comparativo se ha realizado considerando tres niveles: 1) aspectos del régimen seleccionados como ambientalmente significativos. 2) parámetros utilizados para la cuantificación de cada uno de los aspectos. 3) evaluación final de la alteración: Índices. A continuación se abordan con detalle cada una de estas etapas.

Aspectos del régimen de caudales seleccionados como ambientalmente significativos

Este trabajo incorpora aspectos no evaluados en los textos de Richter:

— **Aportaciones anuales**, tanto en magnitud como en variabilidad. En ámbitos climáticos en los que la irregularidad interanual es una característica sustancial del régimen de caudales, resulta imprescindible considerarla para la adecuada caracterización e interpretación ambiental del régimen.

— Variabilidad y estacionalidad de las **aportaciones mensuales**. La variabilidad es imprescindible para recoger una característica esencial del ámbito mediterráneo, y la estacionalidad porque determina referencias que la biota utiliza para sus ciclos vitales y/o relaciones.

— Variabilidad en los valores extremos máximos y mínimos (**avenidas y sequías**), que necesariamente

debe considerarse porque esa variabilidad, entendida como contingencia, define y determina la resiliencia de muchas especies en el caso de los mínimos, y la accesibilidad a áreas de desove o la posibilidad de dispersión de propágulos o las características de la sucesión alogénica, en el caso de las avenidas.

Parámetros seleccionados

Enmarcados en esta caracterización multiparamétrica del régimen de caudales, el principal reto hoy en día es, como se señala en Olden y Poff (2003), discriminar cuales son los parámetros o variables imprescindibles para describir adecuadamente los principales aspectos del régimen de caudales.

Richter *et al.* (1996; 1998) propone 33 parámetros para la caracterización del régimen, que en 2005 amplía hasta 67, y cuya distribución en comparación con los empleados en este trabajo queda recogida en la Tabla 6.

Respecto a lo aquí recogido, pueden hacerse las consideraciones siguientes:

Aportaciones anuales y mensuales

En los índices propuestos relativos a magnitud anual y magnitud, variabilidad y estacionalidad mensual, la metodología propuesta establece una evaluación previa que discrimina según el tipo de «año» (húmedo, medio y seco), lo que implica que cada uno de los índices anteriores se calcula desglosado en tres subíndices. Es esta una de las principales aportaciones de este trabajo, evitando que la acusada variabilidad interanual característica de nuestras latitudes enmascare los valores medios o medianos habituales (anuales y mensuales).

Avenidas

Este trabajo introduce cuatro parámetros vinculados con aspectos ambientales trascendentes para la integridad del ecosistema fluvial. Los dos primeros permiten

¹ EL IHA dispone de un software de libre difusión para su aplicación (<http://www.freshwaters.org/tools>) lo que ha contribuido a la generalización de su uso tanto en aplicaciones estrictamente hidrológicas (evaluación de los cambios hidrológicos originados por las actividades de gestión de los recursos hídricos), como ecológicas (evaluación de la relación entre cambios hidrológicos y respuesta en especies, comunidades o procesos ecológicos) y en recomendaciones para determinar caudales ecológicos. En esta página web puede encontrarse una relación comentada de más de 70 referencias en las que se utiliza el IHA en los en los ámbitos citados.

Tabla 6. Tabla comparativa de los parámetros empleados en la evaluación de la alteración del régimen de caudales en este trabajo y en Richter *et al.* (1996, 1998, 2005)

Componente del régimen natural	Aspecto	N.º de parámetros		
		Martínez y Fernández	Richter IHA (1996, 1998)	Richter EFC (2005)
Valores habituales				
Aportaciones anuales	Magnitud	1		
	Variabilidad	1		
Aportaciones mensuales	Magnitud	1	12 (1 por mes)	
	Variabilidad	1		
	Estacionalidad	2		
Caudales a intervalos horarios (o menores)	Fluctuaciones diarias	1	3 (datos diarios)	
Valores extremos				
Valores máximos (avenidas)	Magnitud	4	5	6
	Variabilidad	2		
	Estacionalidad	1	1	3
	Duración	2	2	3
	Tasas de cambio	Criterios		6
Valores mínimos (sequías)	Magnitud	2	6	14
	Variabilidad	2		
	Estacionalidad	1	1	1
	Duración	2	2	1
	Duración Q = 0	1	1	
	Total parámetros	24	33	34

caracterizar las avenidas extremas (con la serie de máximos caudales diarios anuales) y las definidas como avenidas habituales (a partir del caudal correspondiente al percentil de excedencia del 5% en la curva de duración de caudales) con su significación añadida en términos de duración como caudal que es igualado o superado al menos 18 días al año y al menos durante 7 días consecutivos; los otros índices hacen referencia a dos funciones ambientales claves de los caudales extremos: la definición y conformación del cauce (caudal generador del lecho) y la conectividad con la llanura de inundación (caudal de conectividad).

Los parámetros propuestos por Richter en este apartado están ligados a atributos de duración (día, semana, mes y estación) pues corresponden a los valores máximos diarios y a los obtenidos con medias móviles para pasos de 3, 7, 30 y 90 días, y no se vinculan de manera más menos directa con ningún aspecto ambiental. Los incorporados en 2005, recogen la caracterización de la magnitud de las avenidas habituales (*small floods*: período de retorno ≤ 2 años), extremas

(*large floods*: período de retorno ≥ 10 años) e intermedias (*high flows pulse*: período de retorno entre 2 y 10 años). Aunque en su definición sólo se consideran aspectos vinculados con la frecuencia, no es difícil aceptar que su relación con aspectos ambientales, como la dinámica morfológica y la conectividad con la llanura de inundación, es patente. También incorpora parámetros para caracterizar las tasas de crecida y defluencia.

Sequías

Richter sigue también atributos de duración: mínimo diario y para medias móviles con pasos de 3, 7, 30 y 90 días. En 2005, Richter incorpora tres parámetros para caracterizar, respectivamente, la magnitud, duración y estacionalidad de sequías extremas (inferiores al 10% de los caudales de sequía) y 12, uno por mes, para caracterizar la magnitud de las sequías habituales (resto de caudales de sequía).

Este trabajo propone la caracterización de sequías extremas (a partir de la serie de caudales mínimos anuales) y sequías habituales (a partir del caudal correspondiente al percentil de excedencia del 95% en la curva de duración de caudales) como aquellos caudales que no son superados, como media 18 días al año, y que, además, no superan ese umbral durante al menos 7 días consecutivos; de esta forma en un solo parámetro se considera tanto la magnitud, que determina el hábitat acuático disponible en situaciones de sequía, como la duración, determinante en la resiliencia de las especies.

Comentar también el distinto enfoque en la caracterización de la estacionalidad de avenidas y sequías. Este trabajo evalúa la estacionalidad en base a la presencia o no de avenidas (o sequías) en un mes determinado. Richter propone la evaluación de este aspecto de una manera mucho más restrictiva: estimando el día del año en que se produce el evento.

Evaluación final de la alteración: índices

En la metodología propuesta por Richter (1996; 2005) se calcula para cada uno de los 33 parámetros del grupo IHA, el denominado *rango de variabilidad natural* (RVN) Establecido el concepto de RVN, Richter propone, para evaluar el nivel de alteración de cada parámetro, el siguiente índice general:

$$[(\text{Frecuencia Observada} - \text{Frecuencia Esperada}) / \text{Frecuencia Esperada}] * 100$$

— Frecuencia Observada: frecuencia con la que el parámetro considerado toma valores dentro del RVN en las observaciones correspondientes a los años del régimen alterado.

— Frecuencia Esperada: frecuencia con la que el parámetro considerado toma valores dentro del RVN en las observaciones correspondientes a los años del régimen natural.

La alteración vale cero cuando la frecuencia observada coincide con la esperada. La alteración es positiva (> 0) cuando los años observados son superiores a los esperados y negativa (< 0) cuando el número de años observados es inferior al número esperado.

Respecto a este planteamiento pueden realizarse las consideraciones siguientes:

— Aún cuando la caracterización de avenidas y sequías está mejorada con la incorporación de los 34 parámetros EFC propuestos por Richter en 2005, no ocu-

rre lo mismo con la valoración de la alteración de esos trascendentales aspectos del régimen de caudales, ya que el índice para valorar los niveles de alteración es aplicable sólo para los 33 parámetros de IHA. Por tanto, en la metodología de Richter no hay índices para la valoración detallada de los niveles de alteración de avenidas y sequías.

— La definición del rango de variabilidad natural como el comprendido entre los percentiles del 25% y 75% propuesta por Richter en 1996, es general para el total de 33 parámetros e implica no considerar las colas de la derecha e izquierda de la distribución, lo cual puede suponer el obviar datos con fuertes implicaciones ambientales, por ejemplo sequías extremas o avenidas máximas.

— Podría plantearse situaciones en las cuales para índice de alteración = 0 (frecuencia observada coincide con la esperada), la distribución de los valores correspondientes a observados y esperados dentro del RVN sea manifiestamente diferente, lo que haría difícil aceptar una alteración estrictamente nula.

— Además, Richter no plantea unos indicadores que resuman de manera eficiente la información suministrada por el conjunto de los índices propuestos

Es importante hacer referencia a la principal limitación para la aplicación de la metodología expuesta. Se trata de su fuerte dependencia de la disponibilidad de datos de caudales en régimen natural. Para obtener todos los índices propuestos para la caracterización completa, es necesario disponer de una serie suficientemente larga de caudales diarios en régimen natural. Cuando sólo se disponga de datos de aportaciones mensuales puede hacerse una caracterización del régimen que aunque parcial, es muy útil. La principal ventaja es que los datos de aportaciones mensuales pueden obtenerse sin necesidad de disponer de estaciones de aforo, pues los modelos hidrometeorológicos, ya sean agregados o distribuidos, o los distintos protocolos de restitución a régimen natural, proporcionan estimas suficientemente precisas para esa escala temporal. Esta circunstancia es digna de ser resaltada, porque otorga al método una aplicabilidad muy amplia en países o regiones en las que los registros fonómicos sean escasos.

Conclusiones

La metodología cuyos fundamentos conceptuales se han presentado en este trabajo:

— Ofrece:

- La posibilidad de hacer una cuantificación objetiva de la alteración del régimen natural de caudales que induce el aprovechamiento de los recursos hídricos del río, considerando aquellos aspectos del régimen que tienen mayor significación ambiental.

- Un resultado global (IAG) para cada uno de los componentes principales del régimen de caudales: valores habituales, avenidas y sequías, a través de una valoración conjunta de los índices relativos a cada uno de estos componentes, lo que permite resumir la información recogida en los 24 índices propuestos y facilita su integración e interpretación.

- Una representación gráfica de los IAH obtenidos para cada uno de los componentes principales del régimen de caudales (valores medios; avenidas; sequías), herramienta de gran utilidad en la comprensión de los resultados finales por parte de especialistas en otras materias o público en general.

— Permite:

- Trabajar como banco de pruebas: valorar la alteración que sobre el régimen natural de caudales producirían distintos escenarios de usos y gestión de los recursos hídricos.

- Poner a disposición de la comunidad científica y de los gestores de recursos hídricos un instrumento exigido por la DMA para la caracterización del estado hidrológico de las masas de agua.

- Identificar los aspectos del régimen actual que en mayor medida condicionan la rehabilitación o recuperación del tramo estudiado.

- Fijar criterios objetivos para establecer prioridades en la restauración de ecosistemas fluviales.

Referencias bibliográficas

AGENCIA CATALANA DEL AGUA, 2006. Protocolo para la valoración de la calidad hidromorfológica de los ríos (HIDRI) http://mediambient.gencat.net/aca/documents/ca/directiva_marc/manual_hidri.pdf

ARTHINGTON A.H., 1997. Wounded Rivers, Thirsty Land: Getting Water Management Right. Inaugural Professorial Lecture, Griffith University, Queensland.

BARBOUR M.T., *et al.*, 1999. Rapid Bioassessment Protocols for Use In Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish; 2nd ed. EPA 841-B-99-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.

BUNN S.E., ARTHINGTON A., 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30(4), 492-507.

CIS-WFD, 2003. European Common Implementation Strategy (CIS) for the Water Framework Directive. Guidance on establishing reference conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters. Working Group 2.3, REFCOND Guidance.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO, 2005. Metodología para el establecimiento del estado ecológico según la Directiva Marco del Agua. Protocolos de muestreo y análisis para a) macrófitos; b) fitoplancton; c) invertebrados bentónicos; d) fitobentos; e) ictiofauna. <http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/Calidad/dma/indicadoresbiologicos/protocolos.htm>

MARTÍNEZ C., FERNÁNDEZ YUSTE J.A., 2006. Índices de alteración hidrológica en ecosistemas fluviales. CEDEX, M° de Fomento.

NAIMAN R.J., *et al.*, 2002. Legitimizing Fluvial Ecosystems as Users of Water: An Overview. *Environmental Management* 30(4), 455-467.

OLDEN J.D., POFF N.L., 2003. Redundancy and the choice of Hydrologic Indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications* 19, 101-121.

POFF N.L., *et al.*, 1997. The Natural Flow Regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* 47(11).

RICHTER B.D., *et al.*, 1996. A method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conserv Biol* 10(4), 1163-1174.

RICHTER B.D., *et al.*, 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management* 14, 329-340.

RITCHER B.D., *et al.*, 2005. Indicators of hydrologic alterations Version 7 User's Manual. <http://www.nature.org/initiatives/freshwater/files/ihav7.pdf>

STRIBLING J.B., *et al.*, 1998. Development of a Benthic Index of Biotic Integrity for Maryland Streams. Report no. CBWP-EA-98-3. Maryland Department of Natural Resources.