

Julio 2021

IAHRIS 3.0

RÉGIMEN AMBIENTAL DE CAUDALES (RAC)

Manual de referencia metodológica



CAROLINA MARTÍNEZ SANTA-MARÍA

JOSÉ A. FERNÁNDEZ YUSTE

Título:

Índices de Alteración Hidrológica (IAHRIS 3.0)
Régimen Ambiental de caudales (RAC): Manual de Referencia Metodológica

Catálogo de publicaciones oficiales: <http://www.060.es>
NIPO: XXX-XX-XXX-X

Autores:*Metodología:*

Carolina Martínez Santa-María (Universidad Politécnica de Madrid)
José Anastasio Fernández Yuste (Universidad Politécnica de Madrid)

Software:

Eduardo García Salete (Inclam). Versiones previas.
David Tabernero Pérez (Inclam). Versiones previas
Jorge Alberto Pascual David (Tragsatec). Versión 3.0

Manual de Referencia:

Carolina Martínez Santa-María (Universidad Politécnica de Madrid)
José Anastasio Fernández Yuste (Universidad Politécnica de Madrid)

Edita:

Dirección General del Agua. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto demográfico.

Diseño y maquetación:

Software gratuito: Cualquier operación comercial con el software IAHRIS 3.0 está expresamente prohibida. Los autores y editores no se responsabilizan de los errores y/o fallos del software. El usuario deberá verificar los resultados obtenidos con IAHRIS 3.0, y será de su exclusiva responsabilidad su uso y aplicación

Difusión del texto: Este documento puede ser usado, copiado y distribuido citando la procedencia: Martínez Santa-María, C. & Fernández Yuste, J.A. 2021 Régimen Ambiental de Caudales. Manual de Referencia Metodológica. Ed. Dirección General del Agua (MITECORD). Madrid. p.

INDICE

	pág
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS Y APLICACIONES DE LA METODOLOGÍA RAC.....	1
3. EL ESTADO DEL ARTE.....	2
4. ¿QUÉ ENTENDEMOS POR RÉGIMEN AMBIENTAL DE CAUDALES?	3
5. ¿QUÉ CUALIDADES DEBE TENER EL RAC?.....	4
6. PRINCIPIOS BÁSICOS EN EL DISEÑO DEL RAC.....	6
7. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE RAC HOMOLOGABLES AMBIENTALMENTE	9
7.1. Criterios para la estimación de las aportaciones mensuales del RAC.....	9
7.1.a. Mantenimiento de la estructura de la variabilidad interanual.....	9
7.1.b. Mantenimiento de la estructura de la variabilidad intranual	9
7.2. Criterios para la estimación de caudales máximos o avenidas del RAC.....	12
7.2.a. Caracterización de las avenidas del régimen natural.....	12
7.2.b. Caracterización de las avenidas del RAC.....	14
7.3. Criterios para la estimación de caudales mínimos o sequías del RAC.....	17
7.3.a. Caracterización de las sequías del régimen natural.....	17
7.3.b. Caracterización de las sequías del RAC.....	17
7.4. Resumen del proceso de generación de escenarios de RAC.....	20
8. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE RAC VERSÁTILES.....	22
9. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE RAC APLICABLES.....	24
9.1. Discriminación del tipo para el mes i	25
9.2. Implementación.....	27
10. VALORACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE RAC Y APORTACIÓN DEMANDADA.....	28
10.1. Valoración del grado de alteración hidrológica	28
10.2. Cuantificación de la aportación.....	29
10.3. Valoración global del escenario de RAC.....	30
11. ADECUACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE RAC A LA ICTIOFAUNA.....	31
11.1. Obtención de los caudales de validación.....	32
11.2. Estimación del hábitat disponible.....	33
11.3. Índice de alteración del hábitat disponible (IAHD).....	34
12. SÍNTESIS.....	37
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	38

RELACIÓN DE ABREVIATURAS

AP ^{NAT} _{mes i}	Aportación del mes i en régimen natural
AP ^{NAT} _{min}	Aportación mínima mensual del año en régimen natural. Afectada de los exponentes ^{HÚMEDO} , ^{MEDIO} , ó ^{SECO} hace referencia a esta magnitud en el tipo de año correspondiente.
AP ^{RAC} _{mes i}	Aportación del mes i en régimen ambiental
AP ^{RAC} _{min}	Aportación mínima mensual del año en régimen ambiental. Afectada de los exponentes ^{HÚMEDO} , ^{MEDIO} , ó ^{SECO} hace referencia a esta magnitud en el tipo de año correspondiente.
AV _{HAB}	Avenida biológica, habitual o de limpieza en el régimen natural
AV _{HAB mes i}	Media de los caudales máximos de las avenidas habituales registradas en el mes i
DMA	Directiva Marco del Agua
EA	Estación de aforo
F ^{NAT}	Factor de Variabilidad Natural
F ^{RAC}	Factor de Variabilidad en el régimen ambiental
H	Año húmedo (empleado como subíndice o exponente)
IAH	Índice de Alteración Hidrológica
IAHD	Índice de Alteración del Hábitat Disponible
IAHRIS	Índices de Alteración Hidrológica en Ríos v2.2. Software
IAG	Índice de Alteración Global
IAG _H	Índice de Alteración Global para valores habituales del régimen (aportaciones mensuales)
IDA	Indicador de Demanda Ambiental
I _{mes i}	Índice de magnitud de la avenida habitual del mes i
K	Factor de minoración en el escalado de mínimos ($K < 1$) Afectada de los subíndices ^{HÚMEDO} , ^{MEDIO} , ó ^{SECO} hace referencia a este parámetro en el tipo de año correspondiente.
M	Año medio (empleado como subíndice o exponente)
m	Exponente para el escalado de la variabilidad ($m > 1$)
NAT	Referente al régimen natural
PHABSIM	Physical Habitat Simulation. Software
Q _{CONEC}	Avenida de conectividad. Si aparece con el exponente ^{NAT} ó ^{RAC} hace referencia a la magnitud de esta avenida en el régimen natural o ambiental respectivamente.
Q _{GL}	Avenida geomorfoógica; caudal generador del lecho. Si aparece con el exponente ^{NAT} ó ^{RAC} hace referencia a la magnitud de esta avenida en el régimen natural o ambiental respectivamente.
Q _{5% ^{RAC}}	Magnitud de la avenida habitual en el régimen ambiental
Q _{máx}	Caudal punta o máximo de una avenida
q	Caudal medio diario mensual. Puede estar afectado de los exponentes ^{NAT} ó ^{RAC}
Ra	Ratio de achura del cauce
Rq	Ratio del caudal generador del lecho
RAC	Régimen Ambiental de Caudales
RAC _{imp}	Régimen Ambiental de Caudales implementado
RN	Régimen Natural
S	Año seco (empleado como subíndice o exponente)
T _{conec}	Período de retorno de la avenida de conectividad en régimen natural
T _{GL}	Período de retorno de la avenida geomorfológica en régimen natural
w	Anchura del cauce. Puede aparecer afectada de los exponentes ^{NAT} y ^{RAC}
WUA	Weighted Usable Area.

RÉGIMEN AMBIENTAL DE CAUDALES (RAC): METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS, CRITERIOS PARA SU VALORACIÓN Y PAUTAS PARA SU IMPLEMENTACIÓN

J.A. FERNÁNDEZ YUSTE*

C. MARTÍNEZ SANTA-MARÍA

*Escuela de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural
Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental
Ciudad Universitaria s.n. 28040 Madrid*

1. Introducción

En los últimos años la manera de mirar a nuestros ríos ha cambiado radicalmente. 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.

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 día a día, porque: a) ese asentimiento conceptual puede atenuarse, o incluso desvanecerse, cuando se manifiestan las repercusiones reales que tal aceptación implica, b) son muchos los intereses sociales y económicos que pueden resultar intensamente perturbados y porque c) 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, que pueda presentarse como referente o patrón de actuación.

Con este trabajo se quiere contribuir a conformar criterios científicos, técnicamente viables, sobre los que asentar protocolos de diálogo que ayuden a dar ese paso crucial, ese paso que permita conciliar la realidad vital del río con su uso por parte del hombre.

2. Objetivos y aplicaciones de la metodología RAC

El objetivo principal es desarrollar una metodología que ante la necesidad de establecer un Régimen Ambiental de Caudales (**RAC**), permita proporcionar al gestor del recurso una herramienta con la que incorporar de manera objetiva y cuantificada los aspectos ambientales dentro del protocolo de toma de decisiones.

* autor para correspondencia: tasio.fyuste@upm.es

La metodología propuesta parte de una selección de los aspectos del régimen de caudales que necesariamente deben considerarse en cualquier escenario de RAC, y cimentada sobre ellos, esta metodología:

1. Define un protocolo para conformar una “arquitectura tipo” para el RAC que garantice el mantenimiento de a) la variabilidad inter e intranual, b) la estacionalidad, c) los caudales mínimos, que en el ámbito climático español son los que tienen un papel más restrictivo respecto al mantenimiento de la integridad del ecosistema fluvial y d) las avenidas geomorfológicas, de limpieza y de conectividad. Se trata de una “estructura” con carácter flexible, de tal modo que respetando esos aspectos básicos, permite definir diferentes escenarios alternativos de RAC.
2. Configura un procedimiento de selección del escenario RAC más adecuado, considerando las demandas del recurso y evaluando su adecuación ambiental.
3. Propone un proceso de validación ambiental del escenario seleccionado, utilizando como referente la disponibilidad de hábitat para la ictiofauna.
4. Por último, establece un protocolo de implementación del RAC seleccionado, que facilite su integración en los sistemas de gestión del embalse.

Es importante señalar que no se pretende obtener “un” régimen ambiental de caudales, sino, como ya se ha indicado, proporcionar una herramienta con la que incorporar de manera objetiva y cuantificada los aspectos ambientales dentro del protocolo de toma de decisiones. En ese contexto, esta metodología permite:

- a. Fijado un umbral de calidad ambiental a satisfacer en el río, informar de las aportaciones ambientales que es necesario reservar.
- b. Como contrapunto de lo anterior, puede emplearse para estimar el estado ambiental del río para unas demandas de recursos dadas y, por tanto, para las aportaciones ambientales disponibles una vez atendidas esas demandas.
- c. Hacer análisis de sensibilidad -en cuánto mejora el río por incrementos de aportaciones ambientales-
- d. Estimar la mejora ambiental que resulta de políticas de ahorro y gestión de la demanda que revierten en incrementos de aportaciones con fines ambientales
- e. Dimensionar los esfuerzos necesarios en ahorro y mejora de la gestión, para incrementar las aportaciones ambientales hasta alcanzar un objetivo de calidad ambiental dado.
- f. Presentar, en un formato de fácil interpretación, la evaluación de los escenarios de régimen ambiental con demanda cuantificada y valorados ambientalmente.
- g. Facilitar la utilización de las propuestas de escenarios RAC por usuarios que no necesariamente tienen que ser especialistas ni en gestión de recursos hídricos, ni en la dimensión ambiental de los ríos, propiciando así generar espacios de participación pública apoyados sobre información objetiva y transparente.

3. El estado del arte

Hoy en día los ríos se entienden desde una perspectiva holística, incorporándose en la estimación de los *caudales ecológicos* otros aspectos del ecosistema antes relegados, como por ejemplo, la estructura y morfología del cauce y procesos geomorfológicos asociados (Reiser *et al.*, 1989; Gippel y Stewarson, 1995), el crecimiento de la vegetación (Stromberg y Patten, 1990) y su dependencia del nivel freático (Kondolf *et al.*, 1987; Parsons, 1998), la dinámica de las zonas húmedas presentes en la llanura de inundación y sometidas a pulsos periódicos de inundación-sequía (Harding, 1999), la dinámica sedimentaria y de los caudales sólidos (Schmidt y Potyondy, 2004), la dinámica de los estuarios y zonas de desembocadura (Brizga *et al.*, 2001), etc.

Esta visión netamente ambiental ha determinado muchos de los protocolos disponibles en la literatura especializada para la estimación de caudales ecológicos (Magdaleno, 2009). Pero considerar el río sólo como un ecosistema, es un punto de vista incompleto: Iyer (2005) señala que, además de la integridad ambiental del río, es importante formular la propuesta de caudales ecológicos teniendo en cuenta tanto los medios de vida y el bienestar de las personas vinculadas a los ríos, como el papel que el agua tiene en los valores culturales y espirituales. En esa misma línea, la declaración de Brisbane (2007) – suscrita por más de cuatrocientos investigadores, técnicos y gestores de más de cincuenta países- define los caudales ecológicos como *“aquellos caudales que, en cantidad, estacionalidad y calidad, son necesarios para mantener los ríos y estuarios, así como los medios de subsistencia y bienestar de las personas que dependen de esos ecosistemas”*.

La estimación de caudales ecológicos debe formularse para asegurar la integridad del ecosistema fluvial, tomando conciencia de los usos de los recursos hídricos, de las necesidades que se satisfacen, y convertirse así en un instrumento para la reflexión, para la conciliación, para la toma de decisiones: la estimación de caudales ecológicos debe concebirse para ser integrada en un *“...proceso que promueva el desarrollo coordinado y la gestión del agua, tierra y recursos relacionados, y que permita maximizar el resultado económico y social de una manera equitativa y sin comprometer la sostenibilidad del ecosistema”* (Global Water Partnership, 2000; Hirji & Davis, 2009). Buscar y encontrar vías que permitan compatibilizar el uso de los recursos hídricos con la integridad del ecosistema fluvial es uno de los principales retos a los que debe enfrentarse cualquier metodología que se desarrolle para la estimación de caudales ecológicos (Arthington *et al.*, 2010).

4. ¿Qué entendemos por régimen ambiental de caudales?

La definición propuesta en la declaración de Brisbane, cita tres componentes a considerar a la hora de establecer los caudales ecológicos: cantidad, patrones temporales y calidad. En la propuesta que aquí se presenta se consideran únicamente los dos primeros. Son precisamente los patrones cuantitativos y temporales de los flujos de agua que circulan por un río lo que se conoce como régimen de caudales.

Régimen Ambiental de Caudales (RAC), es un patrón -cuantitativo y temporal- de caudales con el que se mantiene un régimen que garantiza la integridad del ecosistema

fluvial dentro de unos niveles aceptables. Pero, ¿cómo conformar ese patrón? ¿dónde buscar la referencia que permita definirlo?

El nivel de conocimiento actual permite afirmar que el *RN (RN)* de caudales es el elemento vertebrador de los ecosistemas fluviales, estructurando tanto el medio acuático como el ripario, modelando sus condiciones ambientales y posibilitando la variedad de hábitats y el dinamismo en sus interacciones (Poff *et al.* 1997, Strange *et al.*, 1999; Arthington, 2002; Bunn y Arthington, 2002; Naiman *et al.*, 2002; Nilsson y Svedmark, 2002). Es por ello que la etapa básica y crucial en la definición del RAC es la caracterización del RN en aquellos aspectos ecológicamente más significativos. El régimen de referencia es, pues, el RN (Poff *et al.*, 2010), considerando no sólo su magnitudes, sino también frecuencia, duración, variabilidad, estacionalidad y tasas de cambio.

5. ¿Qué cualidades debe tener el RAC?

La declaración de Brisbane establece tres pilares sobre los que fundamentar los caudales ecológicos: 1) Concebirlos como régimen de caudales; 2) Con capacidad para mantener el ecosistema fluvial; 3) Compatibles con el mantenimiento de los medios de subsistencia y bienestar de las personas.

Tabla n°1. Cualidades exigibles al RAC a partir de la declaración de Brisbane (2007)

CAUDALES ECOLÓGICOS (DECLARACIÓN DE BRISBANE, 2007)	CUALIDADES EXIGIBLES
<i>Concebirlos como régimen de caudales</i>	<i>Homologable al RN</i>
<i>Con capacidad para mantener el ecosistema fluvial</i>	<i>Ambientalmente valorable</i>
<i>Compatibles con el mantenimiento de los medios de subsistencia y bienestar de las personas</i>	<i>Con demanda cuantificable</i> <i>Versátil</i> <i>Aplicable</i> <i>Adecuado para la participación pública</i>

Esos tres pilares determinan las cualidades exigibles a cualquier RAC:

- Ambientalmente homologable:** El RAC debe contemplar el *RN como estado de referencia*, tratando de reproducir, atenuadas en magnitud, las pautas del RN que tienen mayor significación en la integridad ambiental del ecosistema fluvial. Para asegurar esa homologación ambiental es necesario 1) seleccionar los aspectos del RN a considerar y caracterizarlos adecuadamente con los correspondientes parámetros y 2) establecer un procedimiento que permita mantener los patrones del RN –variabilidad, estacionalidad, frecuencia- pero atenuarlos en magnitud, teniendo en cuenta los umbrales críticos –máximos y mínimos- que no deben sobrepasarse.
- Versátil:** Con capacidad para ofrecer escenarios que permitan conciliar niveles de integridad ambiental con rangos de uso de los recursos hídricos y con distintas situaciones hidrológicas -tanto las que pueden obtenerse a partir de las series históricas

como las que se deriven de escenarios de cambio climático-. Por tanto esta metodología se formula como un protocolo que permite generar *no* un único RAC sino *un conjunto de escenarios* de RAC. Esos escenarios deben contemplar los aspectos más importantes, y acotarlos para que la alteración del ecosistema fluvial esté limitada. Para garantizar esta acotación en la alteración, estos escenarios deben poseer características comunes en aspectos vinculados con estacionalidad, frecuencia y variabilidad -justamente en aquellos con mayor significación ambiental-, aunque la magnitud de los caudales presente diferentes grados de acercamiento al RN.

- c) **Demanda cuantificable:** Cada escenario debe aportar información respecto al agua que requiere, tanto en cantidad como en sus patrones temporales. Esa información es relevante para el proceso de toma de decisiones y es una cualidad del RAC que debe definirse con precisión y detalle.
- d) **Aplicable:** El RAC debe formularse para poder ser aplicado. Es necesario **contar con los gestores** de los recursos hídricos, con sus protocolos de operación en las obras hidráulicas que manejan, para asegurar la aplicabilidad funcional de los escenarios ofrecidos.
- e) **Ambientalmente valorable:** Es necesario aplicar índices que permitan valorar ambientalmente cada uno de los escenarios considerados. Conceptualmente lo más adecuado sería aplicar relaciones entre la alteración del régimen y la respuesta ecológica. Sin embargo, actualmente no existe un conjunto transferible de relaciones cuantitativas precisas entre alteración y respuesta, aunque sí se puede asegurar que alteraciones del régimen de caudales inducen cambios ecológicos, y que el riesgo del cambio aumenta con la magnitud de la alteración (Poff & Zimmerman, 2010). La ausencia de relaciones cuantificadas entre alteración del RN y respuesta ecológica invita a que la valoración ambiental de cada escenario se haga comparando el régimen alterado con el RN, y que la “distancia” entre ambos se asuma como un indicador de la calidad ambiental del escenario.
- f) **Adecuado para la participación:** Para que el principio de participación pública en la toma de decisiones que preconiza la Directiva Marco del Agua (DMA) sea real, es necesario que la información que se aporta sea objetiva, transparente y **adecuada para su interpretación**. En el proceso de concertación, donde se concilian usos, demandas, régimen concesional, normas de explotación y estado ecológico, es necesario disponer de alternativas -escenarios- ambientalmente homologadas, con una demanda cuantificada, que sean aplicables y con información objetiva sobre el estado ecológico que resultaría si ese escenario fuese finalmente aceptado y aplicado. Así, los responsables de la toma de decisiones dispondrán de elementos de juicio objetivos sobre la mejora ambiental que supone cada escenario y los recursos hídricos que se necesitan, y podrán incorporar esos resultados al proceso de toma de decisiones en la planificación de los recursos hídricos.

6. Principios básicos del diseño del RAC

Como ya se ha señalado, el RN es el estado de referencia para la definición del RAC, tratando de reproducir con este último las pautas con mayor significación ambiental observadas en el primero.

Es en este contexto en el que hay que enmarcar lo que hemos denominado ARQUITECTURA DEL RAC. Se trata de definir los pilares fundamentales para el diseño de una estructura tipo, entendiendo por tal, aquellos componentes del RN de caudales -en sus diferentes aspectos-, que necesariamente deben recogerse para el establecimiento de un régimen ambiental.

Estos aspectos, lógicamente, se corresponden con los utilizados para definir los índices de alteración del régimen hidrológico (Martínez & Fernández Yuste, 2010), pues para establecerlos se seleccionaron los aspectos con mayor significación ambiental. Evidentemente este planteamiento se apoya en la aceptación del paradigma del RN (Poff *et al.*, 1997), planteamiento asumido de manera más o menos explícita en todas las metodologías holísticas para la estimación de regímenes ambientales.

Como elementos de mayor repercusión sobre la dinámica del ecosistema dentro de la compleja estructura del RN, pueden destacarse:

- i. La **variabilidad estacional**, por su trascendencia sobre los ciclos biológicos de las especies -migraciones, emergencias, reproducción, regeneración y saneamiento del cauce...- (Bunn y Arthington, 2002). En este contexto de variabilidad intranual, la importancia relativa de los caudales circulantes en cada estación del año depende mucho del rango de variación estacional: los cauces que drenan cuencas con un régimen de precipitaciones marcado por una notable sequía estival y que no tienen un acuífero importante que sea capaz de inducir una regulación natural notable, tienen en los exiguos caudales de estiaje un elemento de trascendencia destacada, puesto que marcan los mínimos de hábitat acuático disponible para la biota. Esos caudales son, por tanto, una referencia muy importante dentro de la variabilidad estacional.
- ii. Los **caudales directamente vinculados con la fenología de la freza**, tanto por su papel de limpieza de los lechos, dejando libre de finos las graveras, cuanto por cubrir éstas con unos calados adecuados para que los adultos encuentren unas condiciones propicias para el desove. La experiencia demuestra que estos caudales, junto con la variación de la duración de los días y la temperatura del agua, contribuyen a controlar el reloj biológico que desencadena los procesos fisiológicos de la freza. Por tanto, los caudales vinculados a estos requisitos de la ictiofauna deben cumplir, al menos, con una condición cuantitativa -generar cortantes suficientes para movilizar los materiales que colmatan las graveras- y otra cualitativa -producirse en la época del año adecuada-. En cuanto a los macroinvertebrados, esta remoción de los materiales más finos puede ser el papel más importante de los caudales de avenida (Schmidt y Potyondy, 2004) ya que de no producirse esa limpieza, el relleno de los huecos del lecho reduce la heterogeneidad del hábitat

disponible para los macroinvertebrados, así como el oxígeno en las capas bajas del sustrato, pudiendo incluso aislar la zona hiporréica.

- iii. La avenidas, **episodios de baja frecuencia** –alta magnitud- vinculados a los procesos de sucesión natural, especialización, dinámica geomorfológica, conexión periódica con la llanura de inundación, etc. (Palau, 1999). Desde el punto de vista ambiental, estas avenidas tienen dos papeles destacados:
 - Geomorfológico: el papel del caudal generador del lecho (Q_{GL}) o caudal de bankfull en la génesis y dinámica morfológica de los ríos está ampliamente reconocido en la literatura especializada (Knighton, 1998). En ese papel guarda un protagonismo fundamental la magnitud y la frecuencia, pero también debe considerarse la duración, ya que el trabajo geomorfológico necesita que esos caudales circulen durante tiempo suficiente para que sus efectos se manifiesten adecuadamente. Estas avenidas, además del trabajo geomorfológico en un sentido estricto, también afectan a la composición y dinámica de la vegetación riparia y macrófitas, que a su vez condicionan la morfología y la fauna.
 - Conectividad: avenidas que desborden el cauce y ocupen los márgenes y la llanura de inundación, denominadas avenidas de conectividad (Q_{CONEC}), son también esenciales para mantener los hábitats y los complejos procesos vitales que en ese ámbito espacial se desarrollan, estrechamente vinculados a la aparición de esas avenidas de desbordamiento (Brizga *et al.*, 2001; Richter y Richter 2000).
- iv. También debe considerarse la **variabilidad interanual**, para así recoger las pautas de fluctuación en aportaciones anuales, fluctuación que condiciona y caracteriza la respuesta del ecosistema.
- v. Deben contemplarse los **caudales mínimos anuales** como referencia básica para establecer la resiliencia de la biota (García de Jalón, 2000).

Las premisas expuestas anteriormente nos conducen a definir los siguientes pilares o principios básicos en el diseño del RAC:

1. MANTENIMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL: debe incorporar años “húmedos”, “medios” y “secos” en proporciones análogas a las identificadas en el RN.
2. MANTENIMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE LA VARIABILIDAD INTRANUAL: debe mantener una fluctuación de caudales a lo largo del año homologable a la del RN para cada tipo de año.
3. MANTENIMIENTO DE LOS CAUDALES DE LOS MESES MÁS SECOS: debe respetar en mayor medida los caudales de los meses más secos del RN para cada tipo de año.

4. **MANTENIMIENTO DE LAS AVENIDAS BIOLÓGICAS Y DE LIMPIEZA:** debe incorporar avenidas de alta frecuencia –avenidas habituales– con magnitud y estacionalidad análogas a las del RN, para mantener la referencia fenológica de la freza y asegurar la renovación periódica de los lechos.
5. **MANTENIMIENTO DE LAS AVENIDAS GEOMORFOLÓGICAS Y DE CONECTIVIDAD:** debe incorporar avenidas homologables en magnitud y duración a las del RN, considerando su variabilidad interanual, respetando la época en la que naturalmente se producen y con unas tasas de variación en las curvas de crecida y decrecida que no condicionen la dinámica de las comunidades naturales acuáticas como consecuencia del arrastre de individuos en la fase de crecida o de la desconexión brusca del curso principal de agua en la fase de decrecida.
6. **MANTENIMIENTO DE MÍNIMOS ABSOLUTOS:** debe fijar unos caudales mínimos, tanto en magnitud como en duración, y por supuesto en estacionalidad, como umbrales de resiliencia a partir de los observados en RN.

En la *tabla nº2* se resumen los pilares que conforman la arquitectura de cualquier escenario de RAC que se generará con esta metodología.

Tabla nº2. Pilares fundamentales en la definición del RAC

COMPONENTE	ASPECTO DEL RN A MANTENER	PROCEDIMIENTO
APORTACIONES MENSUALES	VARIABILIDAD INTERANUAL	Considerar años húmedos, medios y secos en la misma proporción que en RN
	VARIABILIDAD INTRANUAL	Reducir los factores de variabilidad ¹ mensuales del RN pero manteniendo su distribución a lo largo del año
AVENIDAS	FUNCIÓN GEOMORFOLÓGICA	Reducir Q_{GL} de manera que la anchura del cauce no disminuya en más del 20%
	FUNCIÓN BIOLÓGICA	Reducirlas en la misma proporción en la que se reduce la aportación del mes en el que se presentan
	FUNCIÓN CONECTIVIDAD	Reducir Q_{CONEC} de manera que la proporción $[Q_{CONEC}/Q_{GL}]$ del RAC sea igual a la del RN.
SEQUÍAS	HABITUALES	Mantener los caudales mínimos del mes más seco
	EXCEPCIONALES	Mantener los caudales mínimos naturales de baja frecuencia

Si el RAC va a tomar al RN como referente, es evidente la necesidad de contar con datos suficientes para, con ellos, poder hacer una adecuada caracterización del RN. Respecto a los datos se requieren al menos quince años de caudales diarios, ya sea a partir de los registros de estaciones de aforo (EA) o con valores obtenidos con simulación. Para la caracterización del RN, la aplicación IAHRIS ofrece en sus *informes –nº1, nº2, nº4 y nº6–* un conjunto de parámetros que aportan información sobre componentes y aspectos del régimen de caudales ambientalmente relevantes.

¹ Factor de variabilidad mes i = [Aportación mes i / Aportación mes más seco]

7. Generación de escenarios de RAC homologables ambientalmente

7.1. Criterios para la estimación de las aportaciones mensuales del RAC

El objetivo es presentar un protocolo que permita estimar las aportaciones mensuales de un escenario RAC a partir de las aportaciones en RN, manteniendo tanto la variabilidad interanual como intranual que este último presenta.

7.1.a. Mantenimiento de la estructura de la variabilidad interanual

La marcada variabilidad interanual es un rasgo muy característico de los ríos de latitudes medias, y especialmente de los que drenan áreas de clima mediterráneo. Generar un RAC para un año promedio implicaría no considerar esa variabilidad, que tiene una importante trascendencia tanto ambiental como en la propia gestión de los recursos hídricos. Para la caracterización de esta variabilidad se contará con la serie de aportaciones anuales en RN: el percentil de excedencia correspondiente al 25% se tomará como umbral para los años húmedos, el del 75% para los secos y los medios quedaran en el rango intermedio. Ello permite disponer de tres series en RN, serie de años húmedos, medios y secos (ver figura n°1).

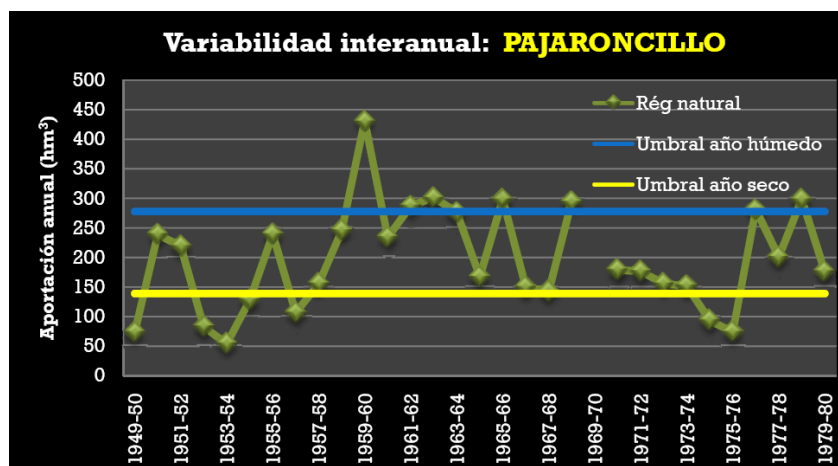


Figura n°1. Caracterización de la variabilidad interanual. Río Cabriel en EA Pajaroncillo

Umbral año húmedo = percentil de excedencia del 25%; umbral año seco = percentil de excedencia del 75%

Lógicamente deberán definirse paralelamente tres RAC, uno para cada tipo de año. De esta forma se dota a la metodología de una gran versatilidad, ya que el RAC podrá variar considerablemente de un año a otro, según las condiciones naturales correspondan a húmedo, medio o seco.

IAHIS ofrece en el *informe n°1* la caracterización de la variabilidad interanual, especificando los umbrales correspondientes.

7.1.b. Mantenimiento de la estructura de la variabilidad intranual

Se establece como hipótesis que, respetando la variabilidad interanual del RN, el RAC mantenga una fluctuación estacional análoga a éste.

La caracterización de la variabilidad intranual del RN, debe hacerse para cada tipo de año (húmedo, medio y seco). IAHIS, para la caracterización de la variabilidad intranual,

ofrece (*informe n°2*) las aportaciones de cada mes, para cada tipo considerado (húmedo, medio y seco) (*figura n°2* y *tabla n° 3*).

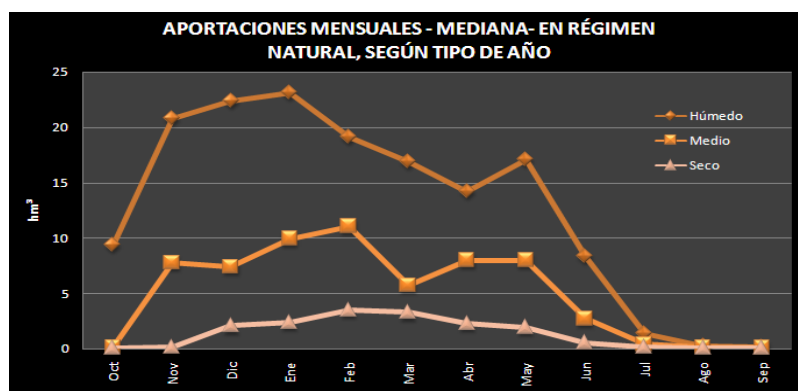


Figura n°2. Ejemplo de caracterización de la variabilidad intranual en cada tipo de año. Río Guadarrama en EA Villalba.

Tabla n°3. Caracterización de la variabilidad intranual en tipo de año. Río Guadarrama en EA Villalba.

TIPO DE AÑO	APORTACIONES MENSUALES (hm³)			CAUDALES DIARIOS MENSUALES (m³/s)		
	HUMEDO	MEDIO	SECO	HUMEDO	MEDIO	SECO
Octubre	9,411	0,160	0,099	3,514	0,060	0,037
Noviembre	20,849	7,782	0,146	8,044	3,002	0,056
Diciembre	22,437	7,431	2,093	8,377	2,774	0,782
Enero	23,147	9,951	2,391	8,642	3,715	0,893
Febrero	19,168	11,065	3,517	7,923	4,574	1,454
Marzo	16,956	5,757	3,297	6,331	2,149	1,231
Abril	14,209	8,003	2,309	5,482	3,088	0,891
Mayo	17,084	8,000	1,974	6,378	2,987	0,737
Junio	8,378	2,700	0,577	3,232	1,041	0,223
Julio	1,406	0,378	0,151	0,525	0,141	0,057
Agosto	0,268	0,143	0,104	0,100	0,053	0,039
Septiembre	0,165	0,117	0,081	0,064	0,045	0,031

El RAC debe mantener, para cada tipo de año, ese patrón estacional, pero reduciendo la magnitud de los caudales. El proceso que permite mantener el patrón inter e intra anual pero reduciendo los caudales, es lo que en este trabajo se denomina **ESCALADO DE LA VARIABILIDAD**.

La secuencia metodológica que garantiza la hipótesis formulada –mantener el patrón natural de variabilidad inter e intra anual–, se sintetiza en los siguientes pasos:

i) Cálculo del Factor de Variabilidad Natural: F^{NAT}

El factor de variabilidad natural (Palau, 1998) se calcula en RN para cada mes y cada tipo de año –húmedo, medio y seco–, como el cociente entre la aportación de cada mes ($Ap^{NAT}_{mes i}$) y la aportación mínima mensual del año (Ap^{NAT}_{min}):

$$F^{NAT}_{mes i} = \frac{Ap^{NAT}_{mes i}}{Ap^{NAT}_{min}} \quad [Ec 1]$$

En la *tabla n°4* se presenta un ejemplo con factores de variabilidad naturales para cada tipo de año.

	Aportación mensual (hm ³) en RN			Factor de variabilidad		
	Húmedo	Medio	Seco	Húmedo	Medio	Seco
Octubre	123,8	48,3	11,0	4,09	3,38	1,27
Noviembre	311,0	114,5	42,0	10,28	8,01	4,86
Diciembre	405,6	268,8	80,9	13,41	18,80	9,37
Enero	337,6	179,3	44,6	11,16	12,54	5,16
Febrero	328,3	128,5	39,9	10,86	8,98	4,62
Marzo	259,0	135,3	55,5	8,57	9,46	6,42
Abril	242,9	142,9	42,6	8,03	9,99	4,93
Mayo	159,3	55,2	24,8	5,27	3,86	2,88
Junio	88,3	38,1	14,4	2,92	2,67	1,66
Julio	42,9	22,1	9,0	1,42	1,54	1,04
Agosto	30,2	15,5	8,9	1,00	1,08	1,03
Septiembre	33,8	14,3	8,6	1,12	1,00	1,00

Tabla n°4. Factores de variabilidad en RN. Río Arga en EA Echauri.

En el caso de ríos efímeros o intermitentes que presenten un valor de $AP^{NAT}_{min}=0$, se produciría una indeterminación al considerar la definición dada al factor de variabilidad. En estos casos, se toma como aportación natural mínima la menor del año con valor distinto de cero. Por supuesto, para el mes con aportación cero su factor de variabilidad será cero.

ii) Cálculo del Factor de Variabilidad Ambiental: F^{RAC}

El factor de variabilidad en el régimen ambiental F^{RAC} se calcula para cada mes y tipo de año, estando definido como una función potencial del factor de variabilidad natural:

$$F^{RAC}_{mes i} = (F^{NAT}_{mes i})^{1/m} \quad [Ec 2]$$

donde m toma valores > 1

El exponente $1/m$ introducido en este trabajo puede considerarse una generalización del propuesto por Palau (1998), que asume $m=constante=2$. Ello permite disponer de un abanico muy amplio de escenarios de patrones para regímenes ambientales. De esta manera, para cada valor de $m>1$ se tendrá una función que permitirá mantener la pauta de variabilidad intranual, y reducir los caudales en el régimen ambiental tanto más cuanto mayor sea el valor de m . Para un valor de m dado, la diferencia entre los factores de variabilidad del RN y del RAC será mayor en aquellos meses que tengan un factor de variabilidad alto, siendo nula en el mes de mínima aportación, ya que $F^{NAT}_{mes min}=1$ (figura n°3).

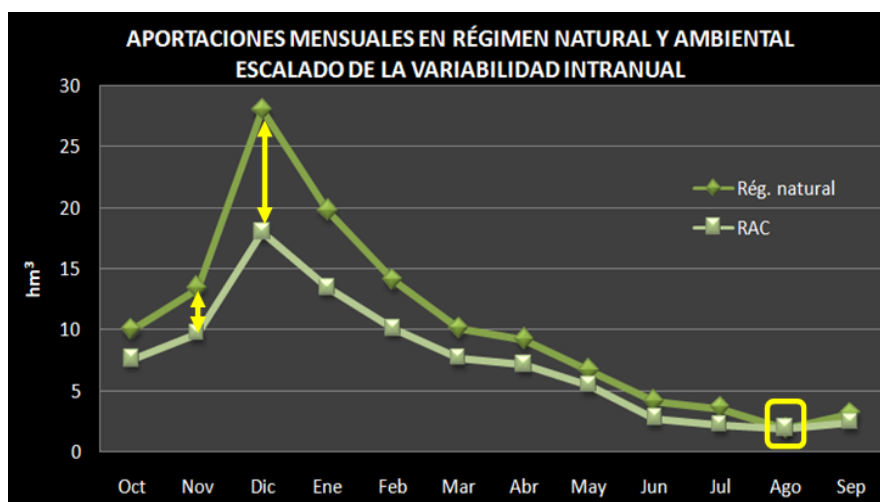


Figura n°3. Aportaciones mensuales del RAC con escalado de la variabilidad para $m=1,2$. Río Louro en EA 2290

iii) Cálculo de las aportaciones mensuales en Régimen Ambiental: Ap^{RAC}

Una vez obtenidos $F^{RAC}_{mes\ i}$, es inmediato asignar las aportaciones mensuales y por consiguiente los caudales medios diarios para cada mes del RAC, y para cada uno de los tipos de año considerados (figura n°4):

$$(Ap^{RAC}_{mes\ i})_{H, M \text{ ó } S} = (Ap^{NAT}_{min})_{H, M \text{ ó } S} * (F^{RAC}_{mes\ i})_{H, M \text{ ó } S} \quad [Ec\ 3]$$

(H= año húmedo; M= año medio; S= año seco)

IAHRIS permite aplicar a cada tipo de año –húmedo, medio y seco- un valor de m distinto.

Es importante señalar que para cualquier valor de m :

- La Ap^{RAC}_{min} será igual a la AP^{NAT}_{min} .
- El escenario RAC presenta la máxima reducción en el valor más alto de la aportación (diciembre en la figura n°3), y esa reducción se va atenuando hasta hacerse cero para el mes de aportación más pequeña (agosto en la figura n°3).
- Para un tipo de año determinado, a medida que aumenta el valor de m , se atenúa la variabilidad intranual en el RAC (figura n°4).

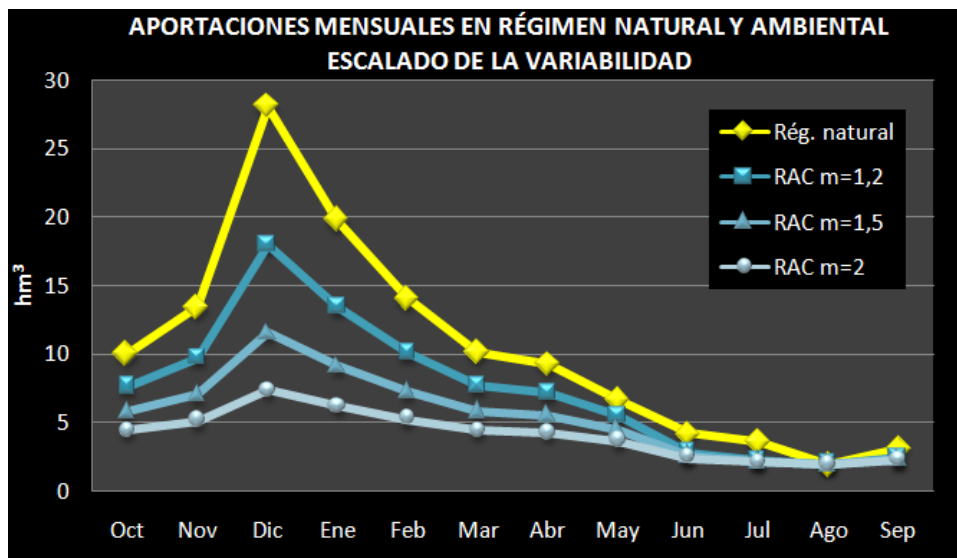


Figura n°4. Influencia del valor de m en el escalado de la variabilidad intranual. Río Louro en EA 2290

7.2. Criterios para la estimación de caudales máximos o avenidas del RAC

7.2.a. Caracterización de las avenidas del RN

La tipología de las avenidas geomorfológicas, biológicas y de conectividad, se caracteriza cuantificando su magnitud, frecuencia, estacionalidad, duración y tasas de crecida y decrecida².

IAHRIS, en su informe n°4 ofrece la siguiente información de las avenidas en RN (tabla n°5):

² En la versión 3.0 no se han incorporado los criterios para caracterizar la duración y las tasas de crecida y decrecida. Se está trabajando para incorporarlos en la próxima versión.

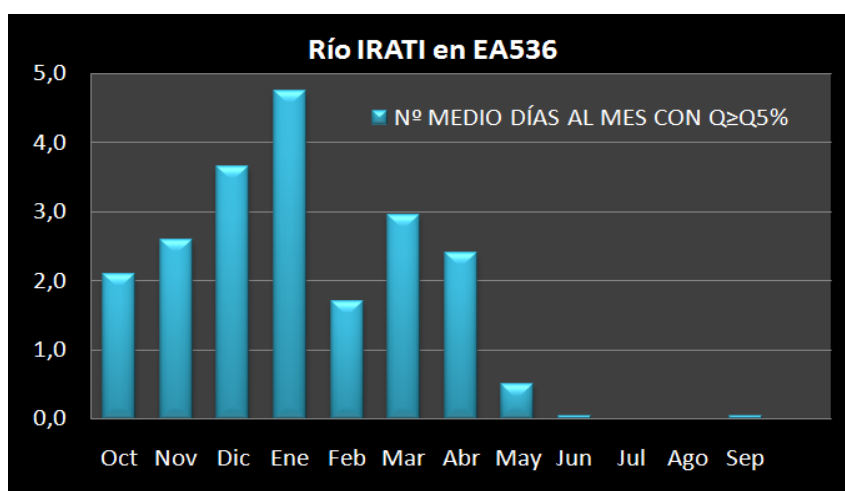
Tabla n°5. Información de avenidas en RN ofrecida por IAHRIS en el informe n°4.

Tipo de avenida	Magnitud	Frecuencia	Estacionalidad y duración
Biológica, de limpieza o habitual	$Q_{5\%}$ = percentil de excedencia 5% en la curva de caudales clasificados	caudal igualado o superado, como promedio, dieciocho días al año	Nº medio de días al mes con $Q \geq Q_{5\%}$ Nº Máximo de días consecutivos con $Q \geq Q_{5\%}$
Geomorfológica	Q_{GL} = caudal generador del lecho o, geomorfológico, asimilable al que define la máxima crecida ordinaria (MIMAM, 2003)	Periodo de retorno correspondiente	
Conectividad	Q_{CONEC} = caudal que duplica el período de retorno asignado a Q_{GL}		

En la *tabla n°6* se muestran, como ejemplo, los valores que ofrece IAHRIS para la caracterización de las avenidas del RN. La *figura n°5* – que también ofrece IAHRIS en el informe n°4- ofrece, de manera conjunta, información sobre la estacionalidad y duración de las avenidas, pero sin distinguir entre las correspondientes a las de alta, media y baja frecuencia.

Tabla n°6. Información de avenidas en RN ofrecida en el informe n°4 de IAHRIS. Río Irati en EA 536.

CARACTERIZACIÓN DE VALORES EXTREMOS MÁXIMOS												
Magnitud y frecuencia	Media de los máximos caudales diarios anuales							Qc		60,44 m³/s		
	Caudal generador del lecho; Período de retorno							QGL; T		54,3 m³/s 2 años		
	Caudal de conectividad; Período de retorno							QcONEC; T		68,6 m³/s 4 años		
	Caudal de la avenida habitual (percentil de excedencia del 5%)							Q5%		40,33 m³/s		
Variabilidad	Coeficiente de variación de máximos caudales diarios anuales							CV(Qc)		0,33		
	Coeficiente de variación de la serie de avenidas habituales							CV(Q5%)		0,22		
Duración	Máximo nº de días consecutivos con caudal medio diario>Q5%									5,85		
Estacionalidad	Nº medio de días al mes con Q>Q 5%											
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Ago	Sep	Oct	Nov
	2,1	2,6	3,7	4,8	1,7	3,0	2,4	0,5	0,1	0,0	0,0	0,1

**Figura n°5.** Información de estacionalidad y duración de avenidas en RN ofrecida como gráfico en el informe n°4 de IAHRIS. Río Irati en EA 536.

7.2.b. Caracterización de las avenidas del RAC

Frecuencia

Para las avenidas del RAC se mantendrá la frecuencia registrada en condiciones naturales:

- Avenidas habituales o biológicas: deben aparecer, como promedio, dieciocho días al año.
- Q_{GL}^{RAC} : si el periodo de retorno de Q_{GL}^{NAT} es de T_{GL} años, cualquier escenario de RAC debería considerar que las avenidas generadoras del lecho deben aparecer, como promedio, también cada T_{GL} años.
- $Q_{CONNECT}^{RAC}$: si el periodo de retorno de $Q_{CONNECT}^{NAT}$ es de $T_{CONNECT}$ años, cualquier escenario de RAC debería considerar que las avenidas de conectividad deben aparecer, como promedio, también cada $T_{CONNECT}$ años.

Estacionalidad

Para todas las avenidas del RAC se mantendrá la pauta de estacionalidad registrada en condiciones naturales. Esa estacionalidad queda caracterizada con la información que facilita IAHRIS. Considerando el ejemplo de la *figura nº5*, las avenidas del RAC deberían prescribirse entre octubre y mayo y preferentemente en diciembre o enero.

Si bien desde un punto de vista estrictamente geomorfológico, la estacionalidad puede tener una importancia menor en las avenidas morfológicas, es obvio que el resto de funciones asociadas a estos caudales (arrastre de macrófitas, remoción del sustrato, transporte de grandes restos vegetales, etc.) si lo están, por tanto deberá respetarse la pauta estacional natural de las avenidas, sea cual sea su carácter.

Duración

La información que IAHRIS suministra (*tabla nº6*), puede utilizarse para acotar superiormente el número máximo de días consecutivos con caudales superiores al $Q_{5\%}^3$.

Magnitud

- Q_{GL}^{RAC}

Lo ideal sería poder incorporar al RAC valores similares al caudal generador del lecho en RN, pero como los escenarios de RAC deben formularse con una atenuación de las magnitudes naturales, conviene dar unas pautas que contemplen esa reducción.

Una de las relaciones morfológicas más ampliamente aceptadas establece que la anchura del cauce (W) es directamente proporcional a la raíz cuadrada del Q_{GL} : $W=K[Q_{GL}]^{0.5}$ (Savenije, 2003, Parker, 1979).

También se constata en la bibliografía especializada (Knighton, 1998) que determinados parámetros morfológicos –secuencia rápido-remanso o salto-pozas,

longitud de onda, amplitud de los meandros...- son directamente proporcionales a la anchura.

En consecuencia, la caracterización de la anchura del cauce puede aceptarse como un indicador de la morfología fluvial, ya que muchas variables geomorfológicas guardan relación de proporcionalidad directa con ese parámetro. Definiendo el ratio de anchura (Ra) como cociente entre la anchura del cauce correspondiente al RAC y la correspondiente al RN, y el ratio del caudal generador del lecho (Rq) como cociente entre el valor de Q_{GL} correspondiente al RAC y al RN, se obtiene la siguiente relación entre Ra y Rq:

$$Ra = \frac{W^{RAC}}{W^{NAT}} = \frac{\kappa * (Q_{GL}^{RAC})^{0,5}}{\kappa * (Q_{GL}^{NAT})^{0,5}} = Rq^{0,5} \quad [Ec 4]$$

$$\text{con } Rq = \frac{Q_{GL}^{RAC}}{Q_{GL}^{NAT}} \quad [Ec 5]$$

Ra = Ratio de anchura de cauce; Rq = Ratio de Caudal Generador del Lecho; W^{RAC} = anchura del cauce en RAC; W^{NAT} = anchura del cauce en RN; Q_{GL}^{RAC} = Caudal Generador del Lecho en RAC; Q_{GL}^{NAT} = Caudal Generador del Lecho en RN; κ = factor de proporcionalidad

Un cambio en la anchura del cauce, y con ella, en el resto de las características morfológicas está determinado por una variación en el caudal generador del lecho. Si se establece un rango de cambio aceptable en la anchura, se puede estimar el correspondiente rango de alteración del Q_{GL} compatible con el mantenimiento de una morfología aceptable.

Así, un $Ra=0,8$ estará vinculado a un $Rq=0,64$ (Ec 4). En otras palabras, una reducción del caudal generador del lecho del 64% inducirá una reducción de la anchura del 80%, y los cambios en los principales parámetros morfológicos del río serán directamente proporcionales a ese valor.

Si se asume como aceptable un cambio en la anchura del 20%, es decir $Ra \geq 0,8$, y por consiguiente $Rq \geq 0,64$, proponiéndose que

$$Q_{GL}^{RAC} \geq 0,64 * Q_{GL}^{NAT} \quad [Ec 6]$$

- Q_{CONEC}^{RAC}

Para establecer su magnitud en el RAC se propone que Q_{CONEC}^{RAC} se estime de manera que

$$[Q_{CONEC}^{NAT} / Q_{GL}^{NAT}] = [Q_{CONEC}^{RAC} / Q_{GL}^{RAC}] \quad [Ec 7]$$

Teniendo en cuenta la relación establecida para Q_{GL}^{RAC} en [Ec6]

$$Q_{CONEC}^{RAC} \geq 0,64 * Q_{CONEC}^{NAT} \quad [Ec 8]$$

- $Q_{5\%}^{RAC}$

A diferencia de las anteriores, de marcado de carácter geomorfológico, las avenidas denominadas biológicas o de limpieza son de carácter habitual, entendiendo como

tal el hecho de que el umbral que las caracteriza es igualado o superado varias veces a lo largo del año. Para determinar este umbral en condiciones naturales se propuso el valor correspondiente al $Q_{5\%}$, lo que en términos de duración supone aquel caudal que es igualado o superado, como promedio, dieciocho días del año.

En estas avenidas, como ya se ha comentado, más que su valor absoluto, influye que en términos relativos presenten una diferencia sensible respecto a los caudales habituales circulantes, ya que es ese cambio relativo el que actúa, junto con otros factores ambientales ajenos al flujo –p.e. el ciclo circadiano-, como llamada desencadenante de algunas etapas del ciclo biológico.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se propone el siguiente protocolo para establecer su magnitud en los escenarios de RAC:

- i) Definir el rango de las avenidas habituales – AV_{HAB} – en el RN: $Q_{5\%} < AV_{HAB} < Q_{GL}$. Extraer de los registros del RN todas las avenidas definidas como habituales, es decir aquellos eventos cuyo $Q_{máx}$ esté en el rango $Q_{5\%} - Q_{GL}$.
- ii) Para cada uno de los meses en los que en condiciones naturales se presentan estas avenidas habituales, evaluar la relación entre la media de las AV_{HAB} correspondientes a cada mes y el caudal medio diario mensual. Este cociente indica, en promedio, en qué tanto por uno el caudal de las avenidas habituales supera al caudal medio diario mensual:

$$I_{mes\ i} = \left[\frac{AV_{HAB}}{q} \right]_{mes\ i}^{NAT} \quad [Ec\ 9]$$

siendo AV_{HAB} la media de los caudales de las avenidas habituales registradas en el mes i , y q el caudal medio diario del mes i . Así, para cada uno de los meses con avenidas habituales en RN se obtiene su correspondiente índice de magnitud de avenida habitual $I_{mes\ i}$.

- iii) Para establecer la magnitud de las avenidas habituales en el RAC se asume la hipótesis de que en el RAC se mantenga el índice obtenido en el RN. Sea $q^{RAC}_{mes\ i}$ el caudal medio diario que para el mes i asigna el escenario de RAC que se esté considerando. El caudal de la avenida habitual del RAC que corresponde a ese mes será:

$$AV^{RAC}_{HAB} = I_{mes\ i} * q^{RAC}_{mes\ i} \quad [Ec\ 10]$$

- iv) En los meses en los que se prevea que ese caudal de avenida habitual juegan un papel significativo en la remoción de los materiales finos depositados sobre el lecho –caudal de limpieza- debe comprobarse que el cortante que genera en secciones representativas del tramo es suficiente para movilizar esos materiales finos. Para esta comprobación pueden emplearse las referencias y criterios recogidos en Komar (1988).

7.3. Criterios para la estimación de caudales mínimos o sequías del RAC

7.3.a. Caracterización de las sequías del RN

La tipología de las sequías, se caracteriza cuantificando su magnitud, frecuencia, estacionalidad y duración. IAHRIS ofrece los siguientes datos para el RN (tabla nº7):

Tabla nº7. Información de sequías en RN ofrecida por IAHRIS.

Tipo de sequía	Magnitud y frecuencia	Estacionalidad	Duración																										
Habitual	Mediana de la aportación mensual del mes más seco para cada tipo de año -húmedo, medio y seco- (Inf. nº2). Las aportaciones se estiman sobre las series correspondientes a los cuartiles 25% (año húmedo), 50% (año medio) y 75%(año seco).	La definida por el mes más seco	Valor representativo a escala mensual																										
	$Q_{95\%}$ = Caudal correspondiente al percentil de excedencia 95% en la curva de caudales clasificados (caudal igualado o superado, como promedio, el 95% del año) (Inf. nº4).	Definida por el mes de mínima aportación o por el de mayor frecuencia con $Q \leq Q_{95\%}$	Nº medio de días al mes con $Q \leq Q_{95\%}$ (Inf. nº4). Nº máximo de días consecutivos con $Q \leq Q_{95\%}$ (Inf. nº4).																										
Singular	<table><tr><th>Caudal diario</th><th>m³/s</th></tr><tr><td>1Qmin</td><td>0,001</td></tr><tr><td>7Qmin</td><td>0,001</td></tr><tr><td>15Qmin</td><td>0,004</td></tr><tr><td>7Q2</td><td>0,028</td></tr><tr><td>7Q5</td><td>0,014</td></tr><tr><td>7Q10</td><td>0,008</td></tr><tr><td>10Q2</td><td>0,038</td></tr><tr><td>10Q5</td><td>0,025</td></tr><tr><td>10Q10</td><td>0,018</td></tr><tr><td>MnQ2</td><td>0,034</td></tr><tr><td>MnQ5</td><td>0,020</td></tr><tr><td>MnQ10</td><td>0,017</td></tr></table> <p>Leyenda: 1Qmin= Caudal mínimo registrado en <i>i</i> días consecutivos (media móvil) 1Qt= Caudal mínimo en <i>i</i> días consecutivos (media móvil) correspondiente a un período de retorno de <i>t</i> años (LPiII) MnQt= Caudal mediano (igualado o superado el 50% de los días) del mes de mínima aportación correspondiente a un período de retorno de <i>t</i> años (LPiII)</p> <p>Caudales de sequías singulares -los valores se corresponden al río Guadarrama en EA Villalba- (Inf. nº9).</p>	Caudal diario	m³/s	1Qmin	0,001	7Qmin	0,001	15Qmin	0,004	7Q2	0,028	7Q5	0,014	7Q10	0,008	10Q2	0,038	10Q5	0,025	10Q10	0,018	MnQ2	0,034	MnQ5	0,020	MnQ10	0,017	Definida por el mes de mínima aportación o por el de mayor frecuencia con $Q \leq Q_{95\%}$.	Determinada por la definición del caudal estimado
Caudal diario	m³/s																												
1Qmin	0,001																												
7Qmin	0,001																												
15Qmin	0,004																												
7Q2	0,028																												
7Q5	0,014																												
7Q10	0,008																												
10Q2	0,038																												
10Q5	0,025																												
10Q10	0,018																												
MnQ2	0,034																												
MnQ5	0,020																												
MnQ10	0,017																												
Caudal nulo	Nº medio de días al mes con caudal diario nulo (Inf. nº4)																												

7.3.b. Caracterización de las sequías del RAC

La metodología propuesta para mantener la variabilidad intranual implica que, sea cual sea el escenario considerado, para el mes más seco, y para los tres tipos de año, se cumple $F^{NAT}_{\text{més más seco}} = FRAC_{\text{més más seco}} = 1$, con independencia del valor de *m*. Eso supone que en el RAC la aportación del mes más seco será igual a la que se tome como referencia para caracterizar el mes más seco del RN. Si se utilizan los valores que aporta el informe nº2 de IAHRIS, la aportación del mes más seco, para los tres tipos de año, es la mediana de los valores registrados: $Ap^{NAT}_{min} = \text{Aportación mediana}$ del mes más seco. Mantener ese valor en el RAC puede resultar un criterio demasiado rígido.

Para permitir utilizar en el RAC otro valor de aportación mínima que no se corresponda con la mediana, se ha considerado la opción del **escalado de la aportación mensual mínima** o **escalado de los mínimos**.

Para ese escalado, el informe n°9 permite introducir un factor de minoración K , de tal forma que:

$$[Ap^{RAC}_{min}] = K * (Ap^{NAT}_{min}) \text{ con } K \leq 1 \quad [Ec 10]$$

Ahora, para estimar las aportaciones mensuales del RAC debe utilizarse la siguiente ecuación:

$$(Ap^{RAC}_{mes i})_{H, M \text{ ó } S} = [K * (Ap^{NAT}_{min})_{H, M \text{ ó } S}] * (F^{RAC}_{mes i})_{H, M \text{ ó } S} \quad [Ec 11]$$

Ese procedimiento permite mantener la variabilidad intranual definida por los correspondientes factores de variabilidad (figura n°6).

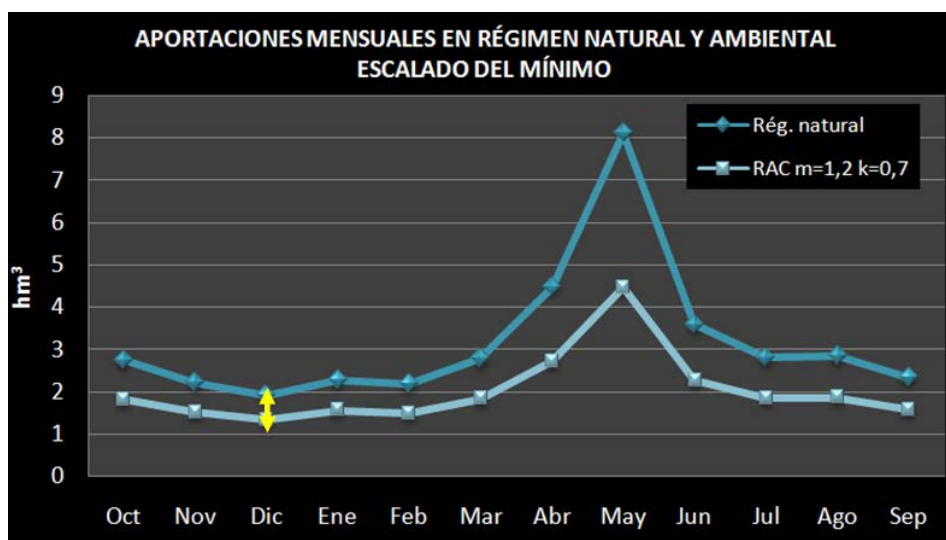


Figura n°6. Escalado de la mínima aportación del mes más seco. Río Aguas Vivas

Para que el usuario pueda establecer el valor de K con arreglo a caudales observados en RN correspondientes a distintas duraciones y frecuencias, IAHRIS ofrece (informe n°9) doce caudales (tabla n°8) que pueden utilizarse para estimar K :

$$K = (\text{caudal seleccionado por el usuario} * \text{factor de conversión de unidades}) / (Ap^{NAT}_{min}) \quad [Ec 12]$$

Caudal diario	m³/s
1Qmin	0,001
7Qmin	0,001
15Qmin	0,004
7Q2	0,028
7Q5	0,014
7Q10	0,008
10Q2	0,038
10Q5	0,025
10Q10	0,018
MnQ2	0,034
MnQ5	0,020
MnQ10	0,017

Legenda:

iQmin= Caudal mínimo registrado en i días consecutivos (media móvil)

iQt= Caudal mínimo en i días consecutivos (media móvil) correspondiente a un período de retorno de t años (LP III)

MnQt= Caudal mediano (igualado o superado el 50% de los días) del mes de mínima aportación correspondiente a un período de retorno de t años (LP III)

Tabla n°8. Caudales del RN de sequías ofrecidos por IAHRIS. Río Guadarrama en EA Villalba

La consideración conjunta de los escalados de la variabilidad ($m > 1$) y de las aportaciones del mes más seco ($K < 1$), permite generar un amplio abanico de escenarios para las aportaciones mensuales (figura n°7)

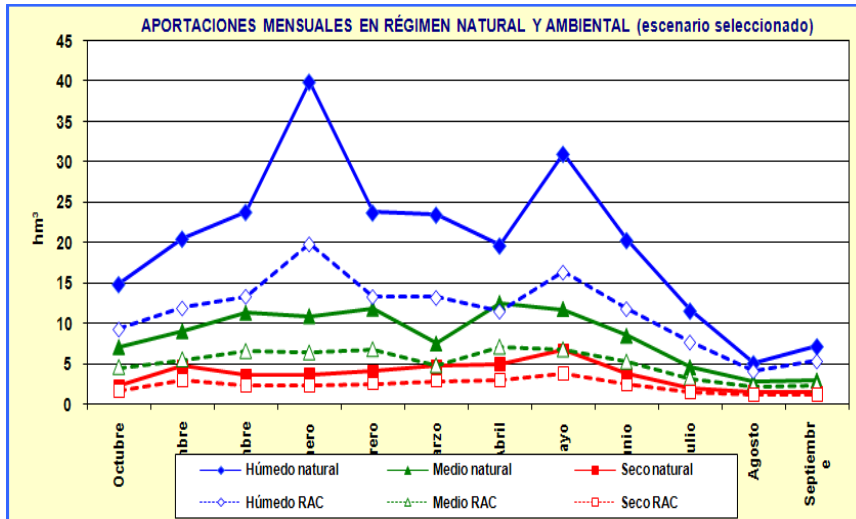


Figura nº7. Aportaciones mensuales del RAC con escalado de la variabilidad ($m=1,3$) y del mínimo ($K=0,8$). Río Alhama en EA185

Magnitud y Frecuencia

La elección del valor de K permite establecer de manera conjunta la magnitud y la frecuencia de los caudales del mes más seco. El procedimiento recomendado es el siguiente:

1. De la lista que facilita IAHRIS en el informe nº 9 (ver un ejemplo en la *tabla nº8*), el usuario selecciona el caudal que, por su magnitud y frecuencia, estime adecuado para el mes más seco del año seco del RAC. A partir de ese caudal estima la aportación mensual correspondiente: $\text{caudal seleccionado} \times \text{factor de conversión de unidades} = [\text{Ap}^{\text{RAC}_{\text{min}}}]^{\text{SECO}}$.
2. El valor K para el escalado del mínimo del año seco se estima con la siguiente relación:

$$K_{\text{SECO}} = [\text{Ap}^{\text{RAC}_{\text{min}}}]^{\text{SECO}} / [\text{Ap}^{\text{NAT}_{\text{min}}}]^{\text{SECO}} \quad [\text{Ec } 13]$$

siendo $[\text{Ap}^{\text{RAC}_{\text{min}}}]^{\text{SECO}}$ el valor establecido por el usuario en el paso anterior y $[\text{Ap}^{\text{NAT}_{\text{min}}}]^{\text{SECO}}$ la aportación mediana del mes más seco del año seco, valor que, como ya se ha señalado, IAHRIS ofrece en el informe nº2.

3. Para la aportación del mes más seco de los años medio y húmedo del RAC, se propone utilizar aquellos valores que hacen que las proporciones con el valor correspondiente al año seco –determinado por el usuario en el paso 1- sean iguales que las que aparecen en el RN:

$$[\text{Ap}^{\text{RAC}_{\text{min}}}]^{\text{MEDIO}} \text{ tal que } [\text{Ap}^{\text{RAC}_{\text{min}}}]^{\text{MEDIO}} / [\text{Ap}^{\text{RAC}_{\text{min}}}]^{\text{SECO}} = [\text{Ap}^{\text{NAT}_{\text{min}}}]^{\text{MEDIO}} / [\text{Ap}^{\text{NAT}_{\text{min}}}]^{\text{SECO}} \quad [\text{Ec } 14]$$

$$[\text{Ap}^{\text{RAC}_{\text{min}}}]^{\text{HÚMEDO}} \text{ tal que } [\text{Ap}^{\text{RAC}_{\text{min}}}]^{\text{HÚMEDO}} / [\text{Ap}^{\text{RAC}_{\text{min}}}]^{\text{SECO}} = [\text{Ap}^{\text{NAT}_{\text{min}}}]^{\text{HÚMEDO}} / [\text{Ap}^{\text{NAT}_{\text{min}}}]^{\text{SECO}} \quad [\text{Ec } 15]$$

Para que esas condiciones se cumplan: $K_{\text{HÚMEDO}} = K_{\text{MEDIO}} = K_{\text{SECO}}$ (obtenido en Ec 13)

Por ejemplo, en el río Guadarrama, y según los datos de la Tabla nº 2, septiembre es el mes más seco con $[Ap^{NAT}_{min}]^{SECO}=0,081 \text{ hm}^3$

Si por situación extrema de sequía, proponemos para ese mes en el RAC -consultando el Informe 9 de IAHRIS, ver tabla nº7- un caudal medio = $7Q2= 0,028 \text{ m}^3/\text{s}$, y lo convertimos a aportación mensual:

$$[Ap^{RAC}_{min}]^{SECO} = 0,028 * 2,592 = 0,073 \text{ hm}^3$$

$$K_{SECO} = 0,073 / 0,081 = 0,9$$

Considerando $K_{HUMEDO} = K_{MEDIO} = K_{SECO}$, y conociendo (tabla nº 2) que $[Ap^{NAT}_{min}]^{HUMEDO} = 0,17 \text{ hm}^3$ y $[Ap^{NAT}_{min}]^{MEDIO} = 0,12 \text{ hm}^3$ pueden obtenerse:

$$[Ap^{RAC}_{min}]^{HUMEDO} = 0,9 * 0,17 = 0,153 \text{ hm}^3$$

$$[Ap^{RAC}_{min}]^{MEDIO} = 0,9 * 0,12 = 0,108 \text{ hm}^3$$

El procedimiento descrito es una propuesta que se brinda al usuario, pero IAHRIS permite también introducir valores diferentes para K_{HUMEDO} , K_{MEDIO} y K_{SECO} .

Para considerar el caso de sequías excepcionales, los caudales que aparecen en el informe 9 pueden servir para establecer un K_{SECO} vinculado a caudales mínimos de baja frecuencia -por ejemplo cualquiera de los asociados a periodos de retorno de 10 años-. Esta opción permite generar escenarios para situaciones de sequías prolongadas, escenarios que sólo se aplicarán si las condiciones del año hidrológico lo justifican.

Estacionalidad

La pauta de estacionalidad de los caudales mínimos está asegurada, ya que todos los escenarios que IAHRIS genera mantienen la estacionalidad de las aportaciones mensuales del RN.

Duración

En el informe nº4 se puede encontrar el nº medio de días al mes con $Q \leq Q_{95\%}$, el nº máximo de días consecutivos con $Q \leq Q_{95\%}$ y el nº medio de días al mes con $Q=0$.

7.4. Resumen del proceso de generación de escenarios del RAC

En la *tabla nº9* se resumen los criterios utilizados para la generación de escenarios de RAC. No aparece referencia a las tasas de cambio, ya que la versión 2.2 no las incorpora, y se está trabajando para que aparezcan en la siguiente versión. Sin embargo, en el epígrafe B2.2. del Manual de referencia metodológica de IAHRIS, se incluye un protocolo de caracterización de estas tasas en RN, que el usuario puede utilizar para caracterizar ese aspecto y aplicarlo al RAC.

Tabla n°9: Resumen de los criterios utilizados para establecer escenarios de RAC ambientalmente homologables

ARQUITECTURA DEL RAC				PROCEDIMIENTO DESCRITO EN	DATOS DISPONIBLES EN IAHRIS
COMPONENTE Y ASPECTO		PRESERVAR DEL RN	METODOLOGÍA		
APORTAC. MENSUALES	VARIABILIDAD INTERANUAL	Proporción de años húmedos, medios y secos	Definir un RAC para cada "tipo" de año	Epígrafe 5.1	Inf. N°1 y 2
	VARIABILIDAD INTRANUAL	Fluctuación estacional	Escalado de la variabilidad interanual: $F_{\text{mes } i}^{\text{RAC}} = (F_{\text{mes } i}^{\text{NAT}})^{1/m}$		
CAUDALES EXTREMOS	AVENIDAS	FUNCIÓN GEOMORFOLÓGICA (Q_{GL})	Magnitud y frecuencia	Epígrafe 5.2	Inf. N°4
			Estacionalidad y duración		
		FUNCIÓN BIOLÓGICA ($Q_{5\%}$)	Magnitud		Inf. N°2 y N°4
			Estacionalidad y duración		
		FUNCIÓN CONECTIVIDAD (Q_{CONEC})	Magnitud y frecuencia		Inf. N°4
			Estacionalidad y duración		
	SEQUÍAS	HABITUALES	Magnitud	Epígrafe 5.3	Inf. N°2 y N°9
			Frecuencia		
			Estacionalidad y duración		
		EXCEPCIONALES	Magnitud y frecuencia		Inf. N° 9
			Estacionalidad y duración		
		Q=0	Estacionalidad		Inf. N°4
			Duración		

8. Generación de escenarios de RAC versátiles

La versatilidad que esta metodología aporta a la hora de generar escenarios de RAC se materializa tanto en los valores correspondientes a aportaciones mensuales como en avenidas y sequías.

Así, para valores mensuales, la versatilidad se concreta en la posibilidad que ofrece al usuario de asignar valores de m y K para establecer el escalado de la variabilidad y de los mínimos.

En el informe nº9 de IAHRIS, el usuario puede seleccionar valores de m y K para cada tipo de año. La hoja de cálculo actualiza las aportaciones en régimen ambiental que corresponden a los valores seleccionados (*tabla nº10*), cuantifica la demanda (*tabla nº11*) correspondiente a ese escenario (en esa cuantificación no se tienen en cuenta las avenidas, ya que su número y magnitud pueden variar considerablemente de un año a otro), y ofrece unos gráficos (*figura nº8*) que permiten visualizar el RAC sólo y con el RN.

Tabla nº10. Aportaciones mensuales del RAC para los valores de m y K seleccionados. Río Segura en EA7001

RESULTADOS						
Parámetros para definir el escenario RAC			Exponente m	1,3	1,2	1,1
			Coficiente k	0,90	0,80	0,70
APORTACIONES EN RÉGIMEN NATURAL (hm³)			APORTACIONES EN RÉGIMEN AMBIENTAL (hm³)			
TIPO DE AÑO MES	HÚMEDO	MEDIO	SECO	HÚMEDO	MEDIO	SECO
Octubre	23,31	14,92	10,12	18,18	10,88	6,60
Noviembre	30,95	16,19	8,01	22,61	11,64	5,33
Diciembre	75,61	20,38	10,15	44,96	14,10	6,62
Enero	85,89	19,61	10,66	49,58	13,66	6,92
Febrero	51,45	31,98	13,33	33,43	20,53	8,47
Marzo	49,98	23,93	9,98	32,69	16,12	6,52
Abril	36,91	24,96	12,51	25,89	16,70	8,00
Mayo	46,72	18,45	10,09	31,04	12,98	6,58
Junio	26,28	16,75	6,66	19,94	11,98	4,51
Julio	16,20	11,20	5,19	13,74	8,56	3,60
Agosto	13,28	8,71	4,63	11,80	6,95	3,24
Septiembre	12,54	8,54	5,16	11,29	6,83	3,58

Tabla nº11. Aportaciones anuales del RAC para los valores de m y K seleccionados. Río Segura en EA7001

RÉGIMEN	APORTACIONES (hm³) AÑO TIPO			
	HÚMEDO	MEDIO	SECO	PONDERADO
NATURAL	469,1	215,6	106,5	224,4
AMBIENTAL	315,2	150,9	70,0	151,5
%	67,18	70,00	65,69	67,14

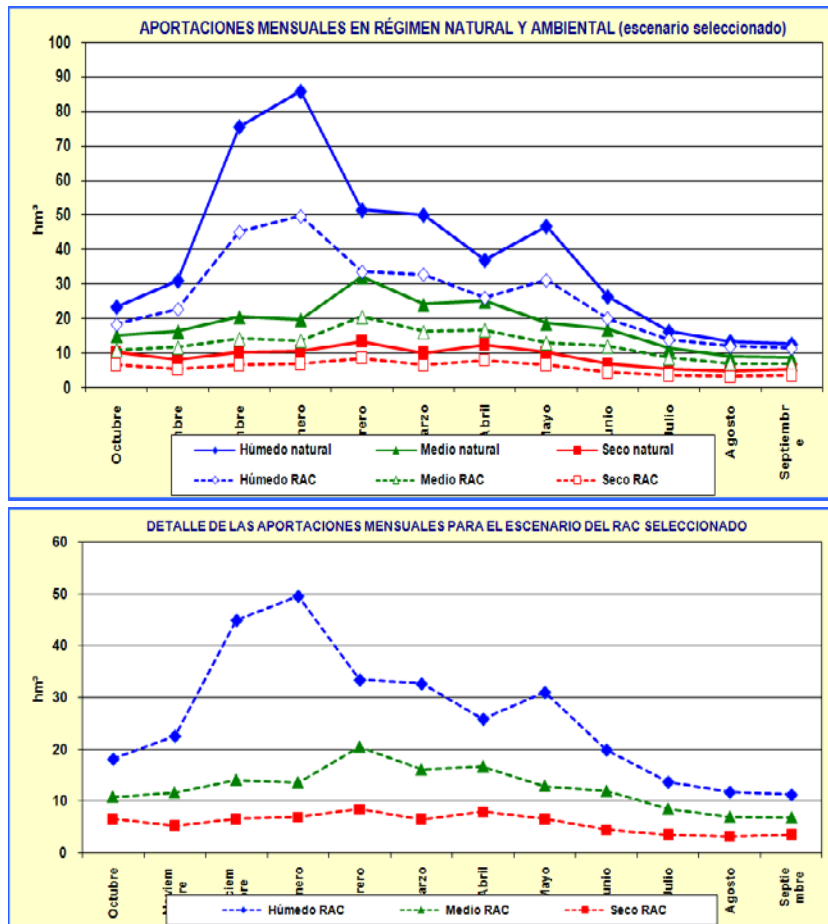


Figura nº8. Gráficas de las aportaciones mensuales del régimen natural y del escenario de RAC seleccionado. Río Segura en EA7001

A la versatilidad para generar escenarios para las aportaciones mensuales, hay que añadir las que la metodología ofrece para las avenidas y las sequías.

En las avenidas, se establece una recomendación (epígrafe 7.2) para que en el RAC, la reducción de los caudales de los tres tipos de avenidas consideradas esté acotada:

- $Q_{GL}^{RAC} \geq 0.64 * Q_{GL}^{NAT}$ [Ec 6]
- $Q_{CONEC}^{RAC} \geq 0.64 * Q_{CONEC}^{NAT}$ [Ec 8]
- AV^{RAC}_{HAB} [Ec 10], tal que se mantenga la proporción observada en RN entre la avenida habitual y el caudal medio diario del mes considerado.

En cuanto a la estacionalidad, el gestor tiene un rango amplio para aplicarlas, dentro de los meses en los que de manera natural se presentan las avenidas; la información que facilita IAHRIS con los meses en los que aparecen un número notable de días con avenidas será la referencia a considerar.

Respecto a la frecuencia, todos los años, con uno o varios episodios, deberá aplicar avenidas de limpieza, acomodándose al régimen de avenidas que de manera natural presente ese año. La frecuencia de las avenidas generadoras de lecho y de conectividad viene determinada por su período de retorno; el gestor deberá aplicarlas, como promedio, con esa frecuencia. Es importante señalar que el período de retorno es un promedio, y que no implica una periodicidad exacta. Será el régimen de avenidas de cada año el que aconseje al gestor la conveniencia de dotar al ecosistema con una avenida generadora de

lecho y /o de conectividad, o ninguna, si en el RN de ese año no aparecen. En la *figura nº9* se muestra un ejemplo de la versatilidad en la asignación de avenidas con la simulación de un escenario RAC.

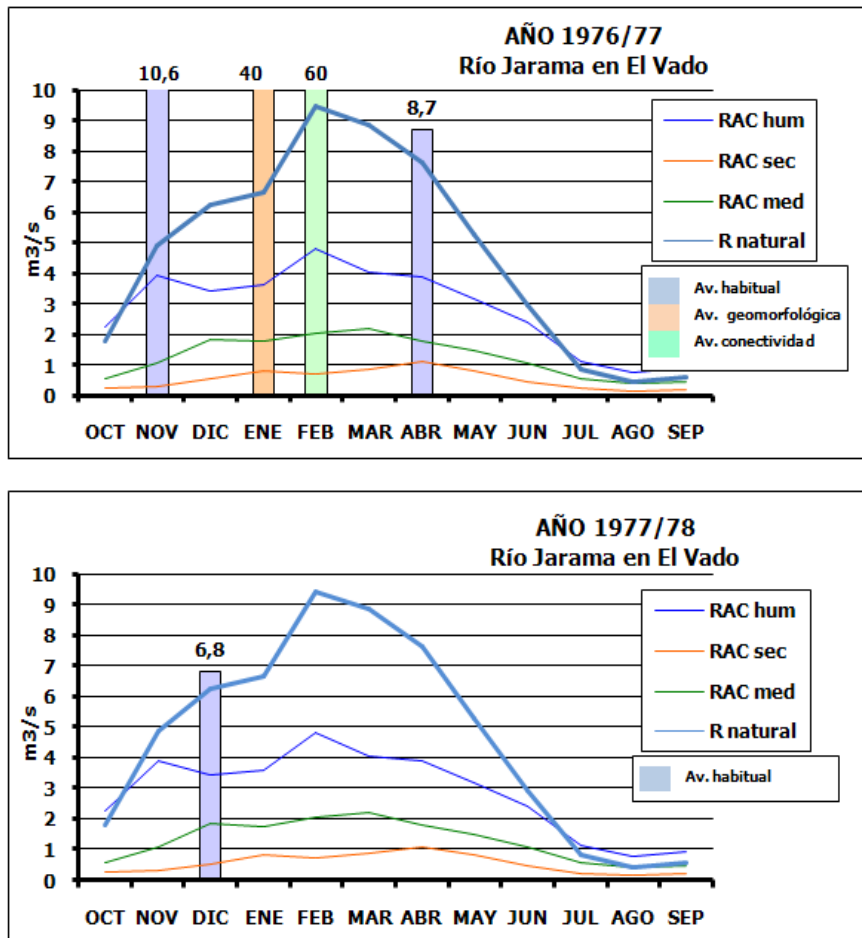


Figura nº9. Adecuación de las avenidas del RAC a las características hidrológicas del año.
Río Jarama en El Vado.

Para las sequías, la metodología permite establecer un escalado del mínimo para situaciones extremas, por ejemplo seleccionando 10Q10 (caudal mínimo en 10 días consecutivos para un periodo de retorno de 10 años) para estimar la aportación del mes más seco del año seco del RAC $[AP^{RAC}_{min}]^{SECO}$ y obtener el valor de K_{seco} correspondiente. Así se puede generar un escenario RAC para años singularmente secos, que el gestor puede aplicar cuando los criterios de sequía prologada así lo aconsejen.

9. Generación de escenarios RAC aplicables

Para asegurar que se mantiene la variabilidad interanual, el RAC presenta aportaciones mensuales distintas según se trate de años húmedos, medios o secos. Pero, ¿cómo saber a qué tipo de año corresponde el que está transcurriendo ahora? Evidentemente será la aportación anual la que nos lo diga, pero ¡habría que esperar a que el año terminase para poder saberlo!

Para solventar esta incertidumbre y que el escenario RAC finalmente elegido sea aplicable en tiempo real, es necesario disponer de un criterio que permita al gestor asignar el caudal ambiental que corresponda.

La metodología propuesta permite asignar una aportación RAC al mes $i+1$ a partir de las aportaciones mensuales naturales acumuladas en el año hidrológico hasta el mes i .

El proceso propuesto para este fin, se esquematiza en las etapas siguientes:

1. Concluido un mes, mes i , se cuantifica la aportación acumulada en RN hasta ese mes desde el comienzo del año hidrológico.
2. Con ese valor de aportación acumulada se determina si ese mes corresponde a un patrón húmedo, medio o seco (ver epígrafe 9.1).
3. El caudal ambiental a implementar en el mes siguiente, mes $i+1$, será el asignado en la estructura del RAC al mes $i+1$ del tipo húmedo, medio o seco determinado en el punto anterior.
4. Transcurrido el mes $i+1$ se repite el proceso para asignar un caudal ambiental al mes $i+2$.
5. Para el primer mes del nuevo año hidrológico se asume la condición -húmedo, medio, seco- del año hidrológico recién finalizado.

9.1. Discriminación del tipo para el mes i

La discriminación del "tipo", húmedo, medio o seco de un mes i se establece, como ya se ha señalado, a partir de las aportaciones mensuales acumuladas, en RN, hasta ese mes desde el inicio del año hidrológico.

Para poder llevar a cabo esta discriminación, y a partir de la serie de caudales diarios en RN, se realiza el proceso siguiente:

1. Los años se agrupan en "húmedos, medios y secos", según su aportación anual, siguiendo los criterios que IAHRIS ofrece en el informe nº1.
2. Para cada uno de los años de cada tipo se obtiene la correspondiente tabla de aportaciones mensuales acumuladas, empezando siempre por el primer mes del año hidrológico -octubre en España-.
3. Se establecen los intervalos de confianza correspondientes al 90% (*figura nº10*).
4. Para el año en curso, conocida la aportación natural acumulada hasta mes i , se entra con ese valor en la *figura nº10* y se le asigna la condición de "húmedo", "medio" o "seco" según el intervalo que le corresponda.

5. Para solventar la indeterminación que se produce en las zonas de solape de los intervalos de confianza de dos tipos distintos, se establece como criterios seleccionar siempre el valor medio (representado por una línea continua en la *figura nº10*) frente al valor correspondiente a los límites (representado por una línea discontinua), y seleccionar siempre el tipo medio frente a los otros dos tipos.

INTERVALOS DE CONFIANZA (90%) PARA LAS APORTACIONES MENSUALES ACUMULADAS DE LOS "AÑOS TIPO"

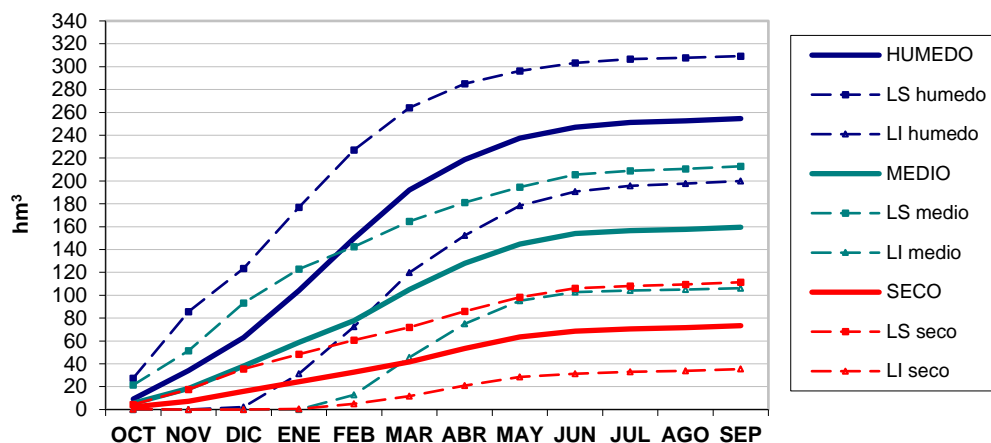


Figura nº10. Intervalos de confianza al 90% para las aportaciones mensuales acumuladas de los años "tipo". La línea gruesa representa la media para cada tipo de año y las líneas discontinuas los límites superior (LS) e inferior (LI) del intervalo de confianza. Río Jarama en El Vado.

En la *figura nº 11* se muestra la gráfica de discriminación del tipo de mes que resultaría al aplicar los criterios expuestos a los datos presentados en la *figura nº10*.

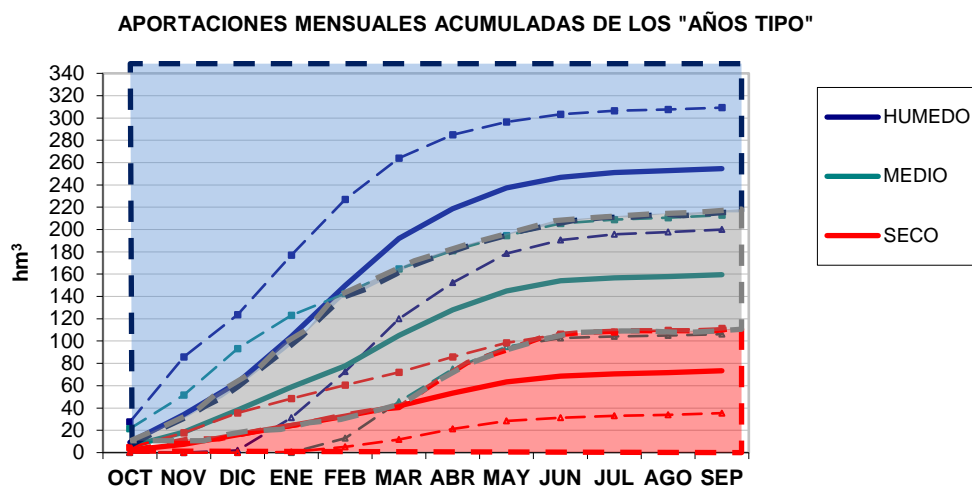


Figura nº11. Aplicación de criterios para la obtención de la gráfica para la discriminación del tipo de mes -húmedo, medio o seco-, a partir de los intervalos de confianza (90%) de las aportaciones mensuales acumuladas en RN. Río Jarama en El Vado.

9.2 Implementación

Con esta secuencia se consigue que el RAC a implementar (RAC_{imp}) en el río pierda rigidez a nivel anual y se adapte mes a mes a las aportaciones naturales, si bien aplicado con un desfase de un mes. Se presentan a continuación (*figura nº 12*), dos ejemplos de aplicación de este criterio.

El año 1995/96 –calificado como “medio” según su aportación anual–, no tiene asignado un RAC tipo medio a lo largo de los doce meses del año hidrológico. Siguiendo la metodología anteriormente expuesta, el RAC_{imp} en ese año, va reflejando la variabilidad natural, modulando los caudales según el patrón de los que se presentan en el RN, aunque, recordamos, desfasados un mes: las aportaciones acumuladas hasta diciembre fueron bajas, por lo que hasta enero se asignó un caudal correspondiente a la condición de seco; en enero la aportación natural fue importante, lo que permitió asignar al RAC de febrero la condición de medio, que se mantuvo ya hasta el final del año hidrológico.

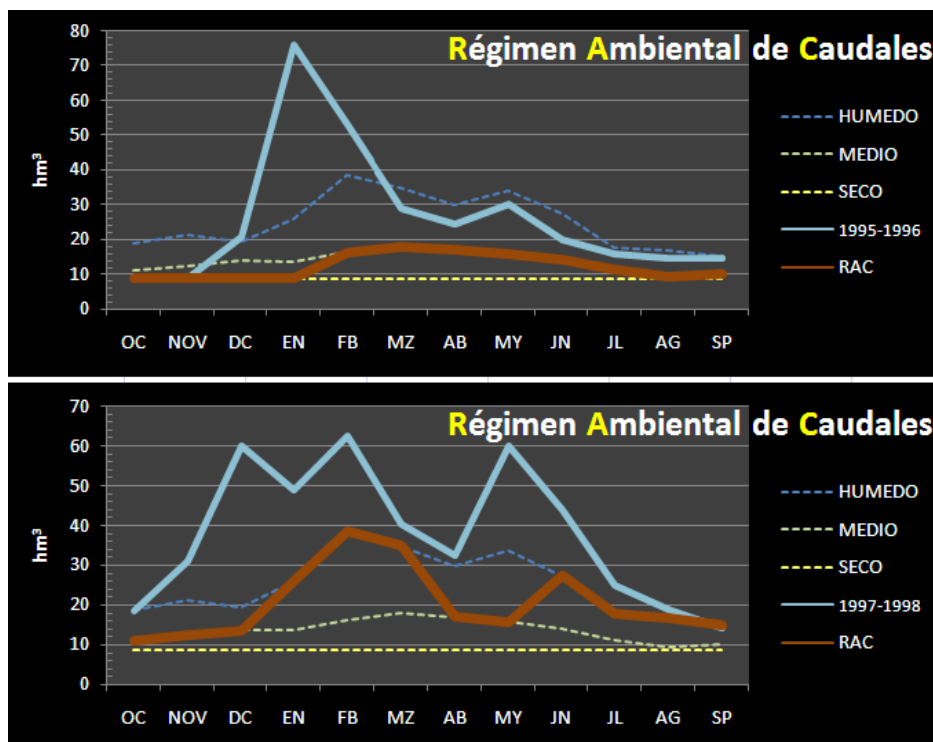


Figura nº12. Ejemplo de implementación de RAC.

Comentarios similares pueden hacerse para el otro ejemplo (año 1997-98). El RN tuvo la condición global de húmedo. Sin embargo, el RAC sólo alcanzó esa condición a partir del mes de enero, después de importantes aportaciones en el mes de diciembre, que se mantuvieron en el RN hasta febrero. En marzo y abril las aportaciones se redujeron, y los valores acumulados llevaron a aplicar a los meses de abril y mayo del RAC la condición de medios. El incremento que se produjo en mayo y los valores altos del resto de los meses, permitió mantener en el RAC la condición de húmedo hasta el final del año hidrológico.

En la *figura nº13* se muestra un ejemplo comparando el RN con el que resulta de aplicar, con el procedimiento antes descrito, un escenario RAC ($m_{HUMEDO}=m_{SECO}=m_{MEDIO}=2$; $K_{HUMEDO}=K_{SECO}=K_{MEDIO}=0,41$) a una serie de 23 años.

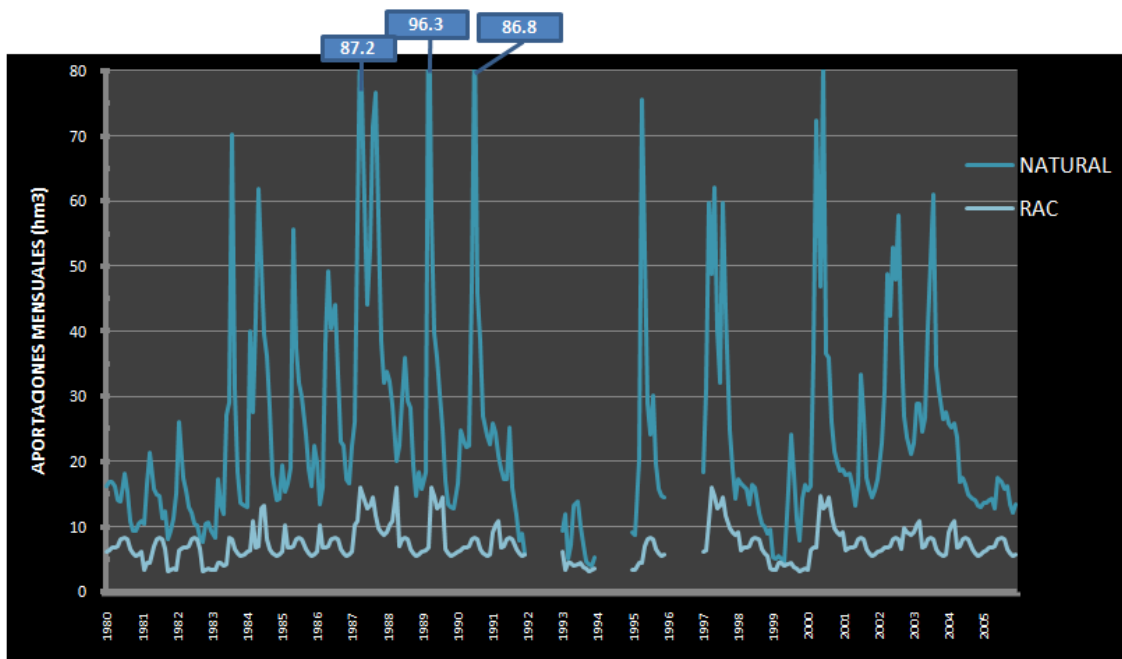


Figura n°13. Simulación de las aportaciones mensuales para un escenario RAC ($m=2$; $K=0,41$). Río Cabriel, en el embalse de Contreras.

10. Valoración de los escenarios de RAC y aportación demandada

Para generar un escenario de RAC, el usuario debe seleccionar los valores de m y K , así como los coeficientes de reducción para los tres tipos de avenidas y los umbrales de magnitud y frecuencia sobre los que establecer el RAC para el caso de sequía prolongada.

Construidos los diferentes escenarios, se hace necesario ofrecer, para cada uno de ellos, tanto una caracterización objetiva del grado de alteración que su implementación supone respecto al RN, como la cuantificación de la aportación anual necesaria para su implementación. De esa forma se ofrecen criterios objetivos que, junto con otros elementos de juicio, pueden ser fácilmente considerados por los agentes implicados en la toma de decisiones.

10.1. Valoración del grado de alteración hidrológica

Lo más adecuado para valorar ambientalmente un RAC sería conocer la respuesta ecológica que cabe esperar con su implementación. Sin embargo, como ya se ha indicado, actualmente no existe un conjunto transferible de relaciones cuantitativas precisas entre alteración y respuesta del ecosistema. La ausencia de esas relaciones invita a que la valoración ambiental de cada escenario se haga comparando el RAC con el RN, y que la "distancia" entre ambos se asuma como un indicador de la calidad ambiental del escenario.

Por consiguiente, para caracterizar la calidad ambiental de un escenario, se utilizarán los índices de alteración hidrológica (IAH) que estima IAHRIS.

Una vez definido el escenario, el protocolo a aplicar es el siguiente:

1. Se selecciona una serie de caudales en RN de, al menos, quince años completos. Esa serie servirá para simular el resultado de aplicar el escenario RAC considerado.

2. Para cada año de la serie se aplica el protocolo expuesto en el epígrafe 9 y se obtiene el RAC correspondiente. En la *figura nº13* se muestra un ejemplo comparando el RN con el que resulta de aplicar un escenario RAC ($m_{\text{HÚMEDO}}=m_{\text{SECO}}=m_{\text{MEDIO}}=2$; $K_{\text{HÚMEDO}}=K_{\text{SECO}}=K_{\text{MEDIO}}=0,41$) a una serie de 23 años.
3. Con la serie RAC del paso anterior, se obtienen los índices de alteración hidrológica (IAH) correspondientes a las aportaciones mensuales -entendidas como valores habituales del régimen de caudales frente a los valores extremos, avenidas y sequías-. El índice de alteración global correspondiente (IAG_H del año ponderado) puede utilizarse para sintetizar la información aportada por IAHRIS y caracterizar así, con un único valor, la cualidad ambiental del escenario considerado. En la *tabla nº12* se muestran los IAH correspondientes a la simulación presentada en la *figura nº13*.

Tabla nº12. Índices de alteración hidrológica para el escenario RAC simulado en la figura nº13. Río Cabriel en el embalse de Contreras.

ÍNDICES DE ALTERACIÓN GLOBAL			NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	NIVEL IV	NIVEL V
ASPECTO	VALOR	CÓDIGO	$0,64 < I \leq 1$	$0,36 < I \leq 0,64$	$0,16 < I \leq 0,36$	$0,04 < I \leq 0,16$	$0 < I \leq 0,04$
VALORES HABITUALES AÑO HÚMEDO	0,12	IAG_H AÑO HÚMEDO					
VALORES HABITUALES AÑO MEDIO	0,17	IAG_H AÑO MEDIO					
VALORES HABITUALES AÑO SECO	0,26	IAG_H AÑO SECO					
VALORES HABITUALES AÑO PONDERADO	0,18	IAG_H AÑO PONDERADO					

Si se tiene presente el proceso de definición del IAG y de delimitación de los cinco niveles de alteración (Nivel I a Nivel V) que aparece recogida en Martínez y Fernández Yuste (2010) puede concluirse que:

- El nivel V correspondiente a valores de IAG tales que $0 \leq IAG \leq 0,04$ implica una alteración del RN de más del 80%
- El nivel IV correspondiente a $0,04 < IAG \leq 0,16$, entre el 80% y el 60%
- El nivel III para $0,16 < IAG \leq 0,36$, entre el 60% y el 40%
- El nivel II para $0,36 < IAG \leq 0,64$ entre el 40% y el 20%
- El Nivel I correspondiente a $0,64 < IAG \leq 1$, alteraciones respecto al RN inferiores al 20%

Con este procedimiento se obtiene, para cada escenario, una calificación ambiental (IAG_H ponderado) resultado de comparar el RN con el régimen que resulta de aplicar ese escenario.

En el ejemplo de la tabla nº 12, el escenario elegido ha obtenido un $IAG = 0,18$. Si el propósito es evaluar la distancia con respecto al RN, este indicador nos permite concluir que el escenario RAC, en valores habituales (aportaciones mensuales) sólo cubre, en términos globales, un 12% de las condiciones naturales. IAHRIS ofrece también una información individualizada de la alteración en cada aspecto (magnitud, estacionalidad, variabilidad y duración).

10.2. Cuantificación de la aportación

La simulación del escenario RAC realizada para su valoración ambiental permite también estimar la aportación requerida. Así, para cada año de la serie, se dispone de su aportación en RN, y con los resultados de la simulación es fácil calcular la correspondiente al RAC. Un sencillo **indicador de demanda ambiental (IDA)** puede ser la proporción que representa la aportación anual RAC respecto a la natural:

$$IDA = [100 * (\text{aportación anual RAC} / \text{aportación anual RN})] \text{ [Ec 16]}$$

El valor medio ponderado⁴ de los IDA de los años simulados, puede utilizarse como referencia para caracterizar la aportación que se necesitaría para dotar convenientemente a ese escenario. En la *tabla n°13* se muestran los valores del IDA para los años simulados con el escenario utilizado en la *figura n° 13*.

AÑO HIDRO.	IDA	Tipo de año en RN
1980-1981	49,8	SECO
1981-1982	43,8	SECO
1982-1983	46,9	SECO
1983-1984	25,1	MEDIO
1984-1985	25,3	MEDIO
1985-1986	28,4	MEDIO
1986-1987	26,1	MEDIO
1987-1988	22,2	HÚMEDO
1988-1989	33,3	MEDIO
1989-1990	31,0	MEDIO
1990-1991	20,8	HÚMEDO
1991-1992	47,4	MEDIO
1993-1994	52,8	SECO
1995-1996	23,2	MEDIO
1997-1998	30,1	HÚMEDO
1998-1999	52,0	SECO
1999-2000	37,1	SECO
2000-2001	28,1	HÚMEDO
2001-2002	38,6	MEDIO
2002-2003	21,8	HÚMEDO
2003-2004	23,5	HÚMEDO
2004-2005	42,9	MEDIO
2005-2006	48,0	MEDIO

Tabla n°13. Indicador de demanda ambiental [IDA=[100*(aportación anual RAC/aportación anual RN)] para el escenario de la figura n°13. Río Cabriel en el embalse de Contreras.

10.3. Valoración global del escenario de RAC

Con la valoración ambiental de cada escenario (IAG_H) y su índice de demanda ambiental (IDA), se puede generar una gráfica que permite interpretar fácilmente dos de los principales aspectos implicados en la toma de decisiones a la hora de seleccionar un RAC: la mejora que se consigue respecto a la situación actual, en lo que a alteración del régimen se refiere, y la cantidad de agua necesaria.

En la *figura n° 16* se muestra un ejemplo de una de estas gráficas obtenida a partir de los resultados de la simulación de seis escenarios RAC.

⁴ Se pondera considerando un peso del 0,25 para los años secos y húmedos, y 0,5 para los medios, pesos que se corresponden con las proporciones que se utilizaron para definir el tipo de año.

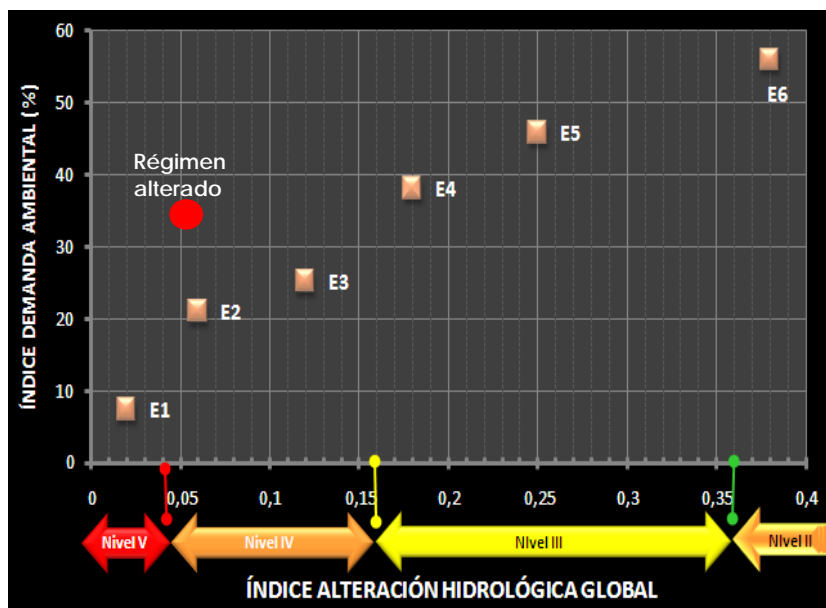


Figura nº16. Índices de alteración hidrológica y de demanda ambiental requeridos por distintos escenarios de RAC.

Características de los escenarios representados

E1	Caudal constante –ausencia de variabilidad inter e intra anual- igual a 15Qmin
E2	Caudal constante –ausencia de variabilidad inter e intra anual- igual a mediana del caudal diario del mes más seco.
E3	K=0,4; m=3
E4	K=0,5; m=2
E5	K=0,5; m=1,5
E6	K=0,8; m=1,3

La información que proporciona esta representación conjunta de varios escenarios frente al régimen actualmente circulante –régimen alterado- es enorme, pues permite, por ejemplo para los datos de la figura nº 16:

- Comprar la situación actual con posibles escenarios de gestión: el régimen actualmente circulante con un IDA del 30% está induciendo un nivel de alteración muy próximo al V (alteración respecto al RN en torno al 80%). Escenarios con demandas inferiores tienen alteraciones parecidas, es el caso de E2, o claramente inferiores, como E3 con nivel IV (alteración respecto al RN entre 80% y 60%).
- Fijar un umbral de calidad ambiental a satisfacer en el río, por ejemplo niveles inferiores al IIII (alteración respecto al RN inferior al 40%) y determinar qué escenarios garantizan esa condición y cual es la aportación que demandan. En este caso sólo el escenario E6 cumpliría este requisito, con un IDA superior al 50%.
- Estimar el estado ambiental del río para unas demandas de recursos dadas y, por tanto, para las aportaciones ambientales disponibles una vez atendidas esas demandas. Por ejemplo si sólo es posible disponer de un 30% del recurso para fines ambientales, puede concluirse que con los escenarios simulados, E3 sería el mejor de ellos, con un nivel IV.
- Hacer un análisis de sensibilidad -en cuánto mejora el río por incrementos de aportaciones ambientales-. Por ejemplo, entre E2 y E3 la mejora ambiental es muy elevada frente al incremento de la demanda exigida, al igual que ocurre entre E5 y E6.

11. Adecuación de los escenarios de RAC a la ictiofauna

Para completar la caracterización de los escenarios RAC, se propone evaluar para las especies piscícolas autóctonas más representativas, cual es la alteración en el hábitat disponible que origina el escenario RAC respecto a la situación natural.

La alteración sobre el hábitat disponible para cada una de las especies principales se evalúa comparando las dos situaciones siguientes:

- Régimen alterado versus RN como situación actual.
- Escenario RAC versus RN como situación potencial. En general esta comparación, que lleva un volumen de trabajo notable, debe realizarse sólo para aquellos escenarios que, con la información disponible, tengan visos de poder ser considerados en la decisión final.

Esta doble comparación, régimen alterado y RAC versus RN, permite contrastar la mejora en la disponibilidad de hábitat que supone la implementación de cada escenario RAC frente al régimen existente, y las distorsiones de ambos respecto al natural.

El procedimiento a seguir se resume en los puntos principales:

1. Establecer para cada uno de los regímenes (Natural, Alterado y escenario RAC) un conjunto de caudales de validación.
2. Estudiar la idoneidad del hábitat para cada uno de los caudales de validación.
3. Caracterizar para cada especie elegida y sus estados de desarrollo, la alteración en esa idoneidad, comparando la situación alterada y el RAC, respecto a la situación natural. Con este fin se propone un nuevo indicador, denominado Índice de Alteración del Hábitat Disponible (IAHD):

IAHD= Hábitat disponible en régimen alterado o escenario RAC/Hábitat disponible en RN [Ec 16]

Es importante destacar que el hábitat idóneo no es el máximo posible, si no el que aparece cuando se considera el RN, y que cualquier cambio respecto a esos valores, ya sea por disminución o por aumento, tendrá siempre la consideración de una alteración negativa ya que supone una desviación de la condición de referencia. Valores de IAHD próximos a 1 indicarían el escenario que, a nivel de disponibilidad de hábitat, se aproxima más al natural.

11.1. Obtención de los caudales de validación

Dados los tres regímenes, Natural, Alterado y escenario RAC se seleccionan, para cada régimen y tipo de año, tres caudales representativos de sus respectivos rangos de variación.

La información de partida necesaria la constituyen los caudales medios diarios mensuales correspondientes a cada tipo de año:

RN: Informe nº2 (IAHRIS)

Régimen Alterado: Informe nº3 (IAHRIS)

Escenario RAC: Informe nº9, según los valores de m y K seleccionados por el usuario

Para cada régimen y tipo de año, los valores de los caudales medios diarios mensuales obtenidos se ordenan de menor a mayor. En la serie creciente formada $\{Q_i, i = n^\circ \text{ de orden}\}$ se establecen tres grupos (*tabla nº14*), representativos de los meses más secos, más húmedos y de carácter intermedio, seleccionando un valor dentro de cada grupo: Q2, Q6-7 y Q11 respectivamente.

Tabla n°14. Caudales para la caracterización del hábitat disponible para la ictiofauna.

CAUDALES MEDIOS DIARIOS MENSUALES EN ORDEN CRECIENTE	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀	Q ₁₁	Q ₁₂
CARÁCTER DEL MES	Meses secos			Meses medios					Meses húmedos			
CAUDALES DE VALIDACIÓN	Q ₂			$Q_{6-7} = \frac{1}{2}(Q_6 + Q_7)$					Q ₁₁			

La validación se realiza por tanto sobre un conjunto de 18 caudales obtenidos al seleccionar 3 caudales representativos -Q₂, Q₆₋₇ y Q₁₁-, en cada uno de los 3 tipos de año -húmedo, medio y seco- para los regímenes natural y alterado, y 9 valores más para cada uno de los escenarios RAC considerados; por tanto, habría que contar con un total de (18+9n) caudales, siendo n el número de escenarios a evaluar.

11.2. Estimación del hábitat disponible

El objetivo de esta fase es evaluar para cada especie y estado de desarrollo las condiciones de hábitat generadas por los tres regímenes en estudio: natural, alterado y escenario RAC. En este proceso pueden distinguirse dos etapas principales:

1ª Cálculo del hábitat disponible correspondiente al conjunto de caudales de validación para cada especie y estado.

Esta fase se llevará a cabo aplicando el conocido modelo de Simulación del Hábitat Físico PHABSIM -Physical Habitat Simulation- (Bovee y Milhouse, 1978; Bovee 1982; Milhouse *et al.*, 1989). PHABSIM combina criterios relacionados con la descripción empírica de las características estructurales del hábitat, simulaciones de la distribución de profundidades y velocidades e idoneidad del hábitat para las especies objetivo (Magdaleno, 2005). Esta combinación revela la relación funcional entre los caudales y el microhábitat a disposición de las especies por unidad de longitud de río, que se expresa en m²/1000m y se denomina *weighted usable area* (WUA). Se trata de un proceso prolijo, con trabajo de campo y gabinete, descrito con detalle en la literatura especializada (PHABSIM for Windows, User's Manual) por lo que no se ha estimado necesario reproducirlo.

El procedimiento se puede resumir en las siguientes fases:

- 1) Delimitar la zona de estudio y clasificarla en segmentos
- 2) Identificar, para cada segmento, los tipos de mesohábitats presentes (rápidos, tablas, pozas) y establecer su representatividad relativa.
- 3) Para cada mesohábitat, seleccionar secciones representativas de las características observadas en el segmento.
- 4) Estimar el WUA de las secciones representativas.
- 5) Estimar el WUA del segmento como media ponderada con las longitudes relativas de las WUAs obtenidas en las secciones para los diferentes caudales de validación.

2º Extrapolar los resultados de la 1ª etapa (caudal de validación-WUA) a régimen de caudales-WUA.

Para ello, en cada segmento y para cada especie y estado, se realiza un doble proceso de ponderación:

- 1) Para cada tipo de año, conocidos los WUA para los caudales de validación - WUA(Q₂), WUA(Q₆₋₇) y WUA(Q₁₁)-, obtener el WUA correspondiente:

$$WUA_{\text{tipo H, M ó S}} = \frac{3 * [WUA(Q_2) + WUA(Q_{11})] + 6 * [WUA(Q_{6-7})]}{12} \quad [\text{Ec } 17]$$

- 2) Conocidos los WUA para cada tipo de año (WUA^{hum}, WUA^{med}, WUA^{sec}), obtener el WUA correspondiente al régimen de caudales:

$$WUA_{\text{RÉGIMEN}} = 0,25 * [WUA^{\text{hum}}] + 0,5 * [WUA^{\text{med}}] + 0,25 * [WUA^{\text{sec}}] \quad [\text{Ec } 18]$$

En definitiva, para cada segmento, especie y estado, el proceso concluye en tres valores: WUA_{NAT}, WUA_{ALT} y WUA_{RAC}, correspondientes a los WUA para RN, alterado y escenario RAC respectivamente. En la *tabla nº15* se presentan los WUA que es necesario estimar.

Tabla nº15. WUA necesarios para la caracterización del hábitat disponible en RN, alterado y escenario RAC.
Una tabla similar hay que completar para cada especie y estado de desarrollo

RÉGIMEN	Tipo de año	WUA				
		CAUDALES DE VALIDACIÓN			Para cada tipo de año	Para cada régimen
		Q ₂	Q ₆₋₇	Q ₁₁		
NATURAL	húmedo	WUA (Q ₂)	WUA (Q ₆₋₇)	WUA (Q ₁₁)	WUA _{NAT} ^{hum}	WUA _{NAT}
	medio	WUA (Q ₂)	WUA (Q ₆₋₇)	WUA (Q ₁₁)	WUA _{NAT} ^{med}	
	seco	WUA (Q ₂)	WUA (Q ₆₋₇)	WUA (Q ₁₁)	WUA _{NAT} ^{sec}	
ALTERADO	húmedo	WUA (Q ₂)	WUA (Q ₆₋₇)	WUA (Q ₁₁)	WUA _{ALT} ^{hum}	WUA _{ALT}
	medio	WUA (Q ₂)	WUA (Q ₆₋₇)	WUA (Q ₁₁)	WUA _{ALT} ^{med}	
	seco	WUA (Q ₂)	WUA (Q ₆₋₇)	WUA (Q ₁₁)	WUA _{ALT} ^{sec}	
Escenario RAC	húmedo	WUA (Q ₂)	WUA (Q ₆₋₇)	WUA (Q ₁₁)	WUA _{RAC} ^{hum}	WUA _{RAC}
	medio	WUA (Q ₂)	WUA (Q ₆₋₇)	WUA (Q ₁₁)	WUA _{RAC} ^{med}	
	seco	WUA (Q ₂)	WUA (Q ₆₋₇)	WUA (Q ₁₁)	WUA _{RAC} ^{sec}	

11.3. Índice de alteración del hábitat disponible (IAHD)

Guardando similitud con los Índices de Alteración Hidrológica, se propone el Índice de Alteración del Hábitat Disponible (IAHD), que se calcula para cada segmento, especie y estado de desarrollo, según la expresión:

$$IAHD_i = \frac{(WUA)_{\text{R. Alterado ó escenario RAC}}}{(WUA)_{\text{R. Natural}}} \quad [\text{Ec } 19]$$

y se generaliza al total del tramo, ponderando según las longitudes relativas asignadas:

$$IAHD = IAHD_1 * \frac{L_1}{L} + IAHD_2 * \frac{L_2}{L} + IAHD_n * \frac{L_n}{L} \quad [Ec\ 20]$$

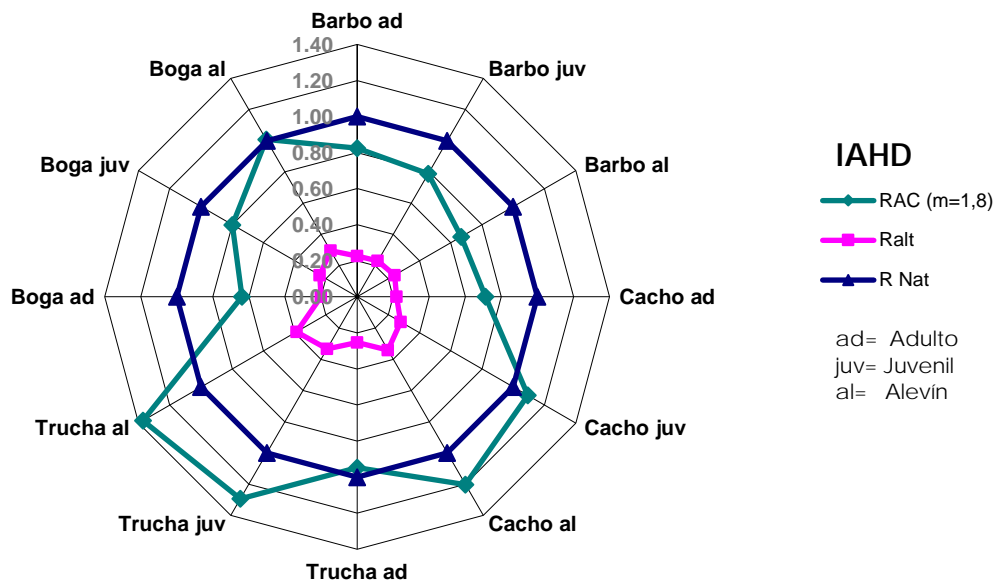
siendo L la longitud total del tramo y Li la longitud correspondiente a cada segmento.

El valor obtenido con el índice IAHD es representativo de la alteración en la disponibilidad de hábitat de un régimen determinado respecto al natural. Al igual que los Índices de Alteración Hidrológica, el IAHD:

- Está acotado inferiormente por 0, indicando, si toma ese valor, una alteración extrema por reducción del hábitat.
- Un valor de IAHD igual a 1 es indicativo de alteración nula.
- Valores superiores a 1, indican un aumento de disponibilidad de hábitat respecto a la situación definida por el RN. Conviene recordar que la referencia es la condición natural, por lo que valores sensiblemente superiores a 1 no deben interpretarse como estados "buenos", ya que indican, aunque sea por incremento, que la situación se aleja de la natural.

En la *figura nº17* se presentan los resultados de aplicar este protocolo para un escenario de RAC ($m=1,8$; $K=1$) en un tramo con cuatro especies.

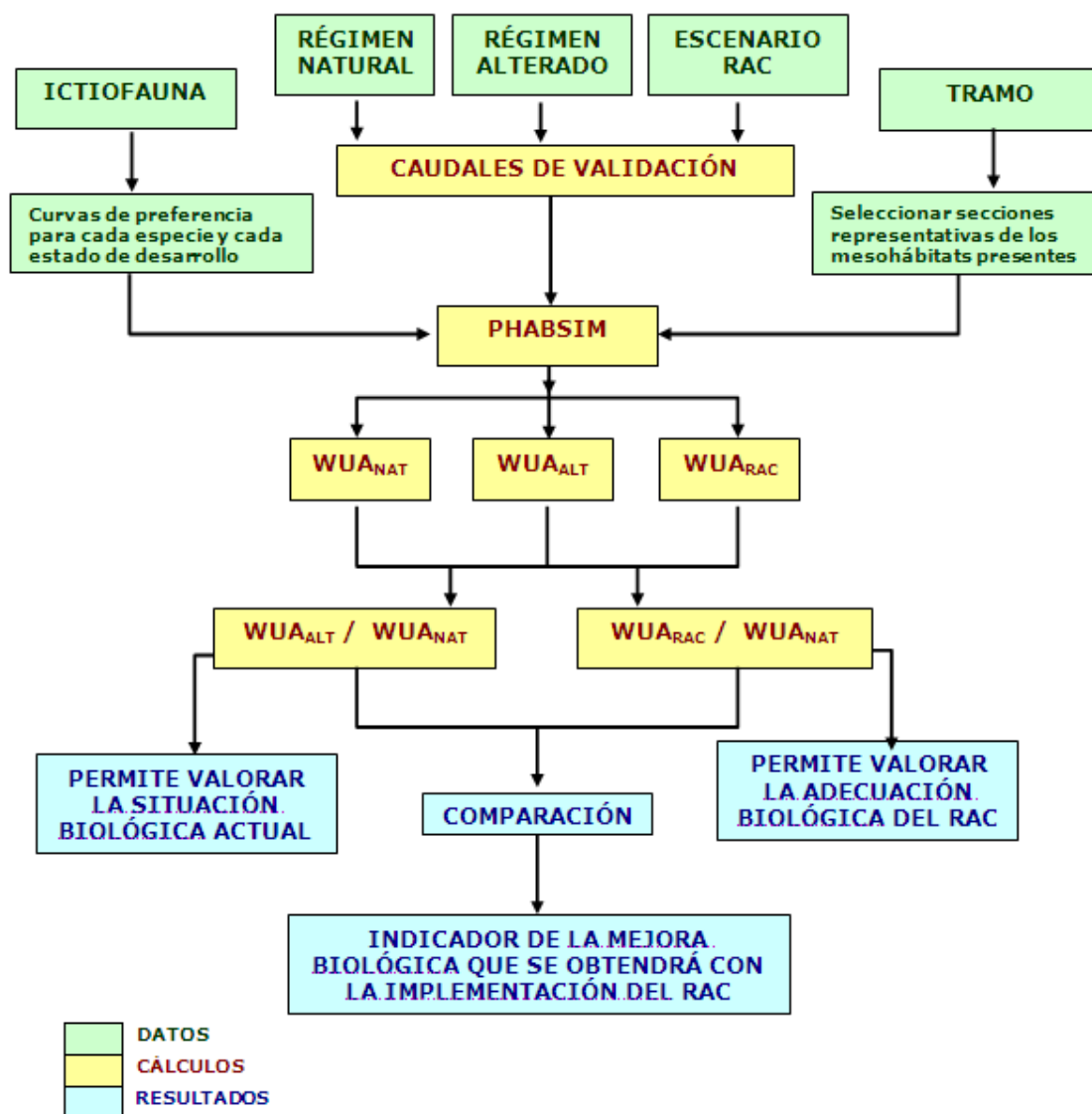
Figura nº17. IAHD para régimen alterado y un escenario RAC en un tramo con cuatro especies. Río Jarama aguas abajo de El Vado.



Un diagrama de flujo del proceso propuesto para analizar la adecuación de los escenarios de RAC para la ictiofauna, se recoge en la *figura nº18*.

Figura nº18. Esquema del protocolo propuesto para el estudio de la adecuación biológica (ictiofauna) de los escenarios de RAC.

OBJETIVO	Evaluar la adecuación biológica de escenarios RAC
ESCENARIOS	Régimen Natural; Régimen Alterado; escenarios RAC
INDICADOR	Hábitat para la ictiofauna (especies autóctonas)
VARIABLE	Weighted Usable Area (WUA= área ponderada útil)
MODELIZACIÓN	Physical Habitat Simulation (PHABSIM)
PROCEDIMIENTO	



12. Síntesis

A continuación (tabla nº16) se presenta un esquema del proceso general de aplicación de la metodología RAC.

Tabla nº16. Síntesis del proceso de la Metodología RAC

DESCRIPCIÓN			METODOLOGÍA
CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN NATURAL Y DEL ACTUAL	1	Obtener series de caudales diarios de, al menos, quince años completos, una en régimen natural y otra en régimen alterado.	Anuarios de aforos http://hercules.cedex.es/anuarioaforos Modelización
	2	Caracterización del régimen natural (estado de referencia)	IAHRIS http://www.ecogesfor.org/recursos.html/IAHRIS-es Inf. Nº1, Nº2 y Nº4
	3	Caracterización del régimen actual o alterado Obtener los índices de alteración hidrológica (comparación del régimen alterado con el natural)	IAHRIS http://www.ecogesfor.org/recursos.html/IAHRIS-es Inf. Nº1a, Nº3 y Nº 5 para la caracterización del régimen alterado Inf. Nº 7a y Nº 7d para evaluar la alteración hidrológica
	4	Identificar los elementos del régimen de caudales más modificados o de aquellos prioritarios a restaurar	Análisis de los informes obtenidos
DEFINICIÓN DEL RAC	5	Generar escenarios RAC en aportaciones mensuales	IAHRIS http://www.ecogesfor.org/recursos.html/IAHRIS-es Inf. Nº 9
	6	Generar escenarios RAC en avenidas y sequías	Seguir el proceso recogido en este documento (epígrafes 7.2 y 7.3)
VALORACIÓN DEL RAC	7	Evaluar la adecuación ambiental de los escenarios de RAC	IAHRIS http://www.ecogesfor.org/recursos.html/IAHRIS-es obtener IAG _H (Inf. Nº 7a) para cada uno de los escenarios de RAC
	8	Evaluar la aportación ambiental de cada escenario de RAC	Calcular el IDA correspondiente a cada escenario
	9	Representación conjunta de los escenarios simulados, y sus correspondientes IAG _H e IDA	Seguir el proceso recogido en este documento (epígrafe 10.3)
VALIDACIÓN DEL RAC	10	Validar ambientalmente los escenarios RAC mediante el hábitat disponible para la ictiofauna	PHABSIM http://www.fort.usgs.gov/products/software/phabsim/ Calcular el IAHD
SÍNTESIS DE RESULTADOS Y TOMA DE DECISIONES			

Referencias

- ARTHINGTON A. (2002): Environmental flows: ecological importance, methods and lessons from Australia. *Mekong Dialogue Workshop. International transfer of river basin development*.
- ARTHINGTON A., NAIMAN R. J., MCCLAIN M. E. Y NILSSON C. (2010): Preserving the biodiversity and ecological services of rivers: new challenges and research opportunities. *Freshwater Biology* (2010) 55, 1-16.
- BOVEE K.D. (1982): A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. *Instream Flow Information Paper n° 12*. Ft. Collins (CO): Office of Biological Services, US Fish & Wildlife Service. FWS/OBS-82/26: 248 pp.
- BOVEE K.D. & MILHOUS R. (1978): Hydraulic simulation in instream flow studies: theory and techniques. *Instream Flow Information Paper n° 5*. Ft. Collins (CO): Office of Biological Services, US Fish & Wildlife Service. FWS/OBS-78/33.
- BRISBANE DECLARATION (2007): 10th International River symposium and International Environmental Flows Conference. Brisbane, Australia, 3-6 September 2007.
- BRIZGA S., ARTHINGTON A., CHOY S., KENNARD M.J., MACKAY S., PUSEY B. Y WERREN G. (2001): *Environmental Flow Report: Pioneer Valley*. Water Resource Plan. Natural Resources and Mines. Queensland Government.
- BUNN S.E. & ARTHINGTON A. (2002): "Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity". *Environmental Management Vol. 30, n°4, pp. 492-507*.
- GARCÍA DE JALÓN D. (2000): Concepto de caudal ecológico. Introducción a las metodologías de modelización del hábitat físico. Jornada sobre evaluación de regímenes de caudales ecológicos mediante modelización del hábitat físico. CEDEX. Madrid.
- GIPPEL G.J. & STEWARDSON M.J. (1995): "Development of an environmental flow strategy for the Thompson River, Victoria, Australia". *Regulated Rivers: Research and Management 10*: 121-135.
- GLOBAL WATER PARTENERSHIP (2000): Integrated Water Resources Management. SE -105 25 Stockholm, Sweden.
- HARDING W. (1999): The case of environmental flow requirements for wetlands and estuaries. Draft Southern Waters Report.
- HIRJI R. & DAVIS R. (2009): Environmental Flows in water resources, policies, plans and projects. Findings and recommendations. Environment and Development. World Bank Publications. 189 pg.
- IAHRIS v2.2 <http://www.ecogesfor.org/recursos.html/IAHRIS-es>
- Iyer, R. R. 2005. The Notion of Environmental Flows: A Caution NIE/IWMI *Workshop on Environmental Flows*, New Delhi, March 23-24, 2005
- KNIGHTON D. (1998): Fluvial Forms and Processes. A new perspective. Arnold, London.
- KOMAR P.D. (1988): Sediment transport by floods. En *Flood Geomorphology* (Baker V.R., Kochel R.C. y Patton P. C.).
- KONDOLF G.M., WEBB J.W., SALE M.J. Y FELANDO T. (1987): "Basic hydrologic studies for assessing impacts of flow diversions on riparian vegetation: examples from streams
- MAGDALENO MÁS F. (2005): *Caudales ecológicos: conceptos, métodos e interpretaciones*. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX. Ministerio de Fomento
- MAGDALENO F. (2009): *Manual técnico de cálculo de caudales ambientales* Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- MARTÍNEZ C. & FERNÁNDEZ YUSTE J.A. (2010): IAHRIS Índices de Alteración Hidrológica en Ríos. Manual de Referencia Metodológica. Versión 2.2.
- MILHOUS R.T., UPDIKE M.A. Y SCHNEIDER D.M. (1989): Physical habitat simulation system reference manual - version 2. *Instream Flow Information Paper 26*. U.S.D.I. *Fish Wildl. Serv. Biol. Rep.* 89(16).
- MIMAM, MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2003): La delimitación del Dominio Público Hidráulico y de sus zonas inundables. El Proyecto Linde. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad del Agua.
- NAIMAN R.J., BUNN S.E., NILSSON C. PETTS G.E., PYINAY G. Y THOMPSON L.C. (2002): "Legitimizing Fluvial Ecosystems as Users of Water: An Overview" *Environmental Management Vol. 30, No.4, pp.455-467*.
- NILSSON & SVEDMARK (2002): "Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: riparian plant communities". *Environmental Management Vol. 30, No. 4, pp. 468-480*.
- PALAU A. (1998): *El caudal básico. Método para la gestión hidrobiológica de ríos regulados*, Madrid, CEDEX.
- PALAU A. (1999): Aspectos biológicos de los caudales ecológicos. *I Congreso sobre caudales ecológicos*. Terrassa 1999.
- PARKER G. (1979): Hydraulic geometric of active gravel rivers. *Journal of the Hydraulic Division*. American Society of Civil Engineers: 105, HY9, 1185-201.
- PARSONS R. (1998): A protocol to define the preliminary groundwater reserve: Discussion document. Parsons and Associates, Somerset West.
- PHABSIM: <http://www.fort.usgs.gov/products/software/phabsim/>
- POFF N.L., ALLAN J.D., BAIN M.B., KARR J.R., PRESTEGAARD K.L., RICHTER B.D. SPARKS R.E. Y STROMBERG C. (1997): "The Natural Flow Regime. A paradigm for river conservation and restoration" *BioScience Vol. 47 No.11*

- POFF N.L. & ZIMMERMAN J.K.H. (2010): Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology* (2010) 55, 194–205.
- REISER D.W., RAMEY M.P. Y WESCHE T.A. (1989): Flushing flows. En Gore, J. A . y Petts G.E. (Eds). *Alternatives in regulated river management*. CRC Press, Inc., Florida.
- RICHTER, B.D. & RICHTER H.E. (2000): Prescribing flood regimes to sustain riparian ecosystems along meandering rivers. *Conservation Biology* 14: 1467-1478.
- SAVENIJE H.H.G. (2003): The width of a bankfull channel; Lacey's formula explained. *Journal of Hydrology* 276 (2003) 176-183.
- SCHMITD L.J. & POTYONDY J.P. (2004): *Quantifying Channel Maintenance Instream Flows: An Approach for Gravel-Bed-Streams in the Western United States*. USDA, United States Department of Agriculture, Forest Service. General Technical Report RMRS- GTR-128.
- STRANGE E.M., FAUSCH K.D. Y COVICH A.P. (1999): "Sustaining Ecosystem Services in Human-Dominated Watersheds: Biohydrology and Ecosystem Processes in the South Platte River Basin". *Environmental Management* Vol. 24, No. 1, pp.39-54.
- STROMBERG J.C. & PATTEN D.T. (1990): "Riparian vegetation instream flow requirements: a case study from a diverted stream in the eastern Sierra Nevada, California, USA". *Environmental Management* 14: 185-194.