

Software financiado por la Dirección General del Agua
(Mº de Medio Ambiente), mediante convenio con el CEDEX



Índices de Alteración Hidrológica en RÍOS



MANUAL DE REFERENCIA METODOLÓGICA

VERSIÓN 1

Enero 2008



Carolina Martínez Santa-María

José Anastasio Fernández Yuste



POLITÉCNICA

*A nuestras familias,
por el tiempo robado*

Título:

Índices de Alteración Hidrológica en Ríos (IAHRIS)
Manual de Referencia Metodológica
Versión 1

Autores:

Carolina Martínez Santa-María
José Anastasio Fernández Yuste

Edición:

Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente mediante convenio con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

Copyright © Ministerio de Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Madrid.

Documento de libre difusión.

Cualquier operación comercial con este documento 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, y será de su exclusiva responsabilidad su uso y aplicación

Este documento puede ser usado, copiado y distribuido citando la procedencia:

Martínez Santa-María, C. & Fernández Yuste J.A., 2008. IAHRIS Índices de Alteración Hidrológica en Ríos. Manual de Referencia Metodológica. Versión 1.

AGRADECIMIENTOS

Es de justicia reconocer a aquellos que han hecho posible el trabajo que con este texto sale a la luz, pero ese reconocimiento, siendo necesario, no sería suficiente, porque además es imprescindible corresponder a su apoyo con nuestra estima y gratitud:

Tenemos que empezar por dar las gracias al Servicio del Medio Natural de Guadalajara, que con su inquietud y ganas de conocer con rigor y detalle los efectos ambientales derivados de la explotación del embalse de El Vado nos permitieron dar los primeros pasos en el verano del 2001.

A D. Francisco Flores Montoya y D. Gabino Liébana del Pozo, que desde la Confederación Hidrográfica del Tajo nos facilitaron información, nos escucharon y aportaron reflexiones siempre útiles.

A D. Bernardo López-Camacho que nos brindó los datos disponibles en el Canal de Isabel II y nos ilustró sobre las características y peculiaridades de la explotación del embalse de El Vado.

Gracias especialmente a D. Rafael Romeo García, paciente escuchando y generoso aportando.

A todos los que han utilizado esta metodología de los Índices de Alteración Hidrológica durante los años previos a esta publicación por su confianza, comentarios y aportaciones. Especialmente a Victor Cifuentes (Confederación del Guadalquivir) que derrochó con nosotros tiempo y valiosas reflexiones. También a Pepe Barquin (Instituto de Hidráulica Ambiental. Universidad de Cantabria) y Avelino Díaz Salazar (Infraestructura, Cooperación y Medio Ambiente). Gracias a Miguel Ángel Rubio (Proyecto EFLUS), que confió en IAHRIS para la caracterización de la alteración del régimen de caudales en el tramo medio y alto del río Júcar y en el río Cabriel.

Muchas gracias a nuestras compañeras de la Unidad Docente de Hidráulica de la EUIT Forestal, siempre dispuestas, siempre animando.

Gracias a Valentín Gómez Sanz por sus lúcidas recomendaciones, a Alejandro Vivar Sanz por su inestimable trabajo en la obtención de la expresión para la cuantificación del Índice de Alteración Global, y a Juan Ignacio García Viñas y César López Leiva, capaces de traducir una idea en hermosos dibujos.

Nuestro agradecimiento también a D. Juan Manuel Varela Nieto y a D. Fernando Magdaleno Mas (Área de Ingeniería Ambiental del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX), y a D. Francisco Javier Sánchez Martínez (Dirección General del Agua. M^o de Medio Ambiente) por su inquebrantable confianza y apoyo.



Y por supuesto mil gracias
al río Jarama
por su continuo y generoso fluir.

NOTA DE LOS AUTORES

Este manual de Referencia Metodológica puede considerarse una versión ampliada y actualizada del libro "ÍNDICES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA EN ECOSISTEMAS FLUVIALES" (CEDEX 2006), en lo que a parámetros e índices se refiere. No obstante el libro recoge una caracterización de las tasas de crecida y decrecida de avenidas que IAHRIS no incorpora en la versión 1.0. Así mismo incluye una interpretación ambiental de la alteración hidrológica evaluada con los índices, y el desarrollo de un caso práctico (Embalse de "El Vado". Río Jarama).

E.3 ÍNDICES DE ALTERACIÓN DE SEQUÍAS 88

IAH 15: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS SEQUÍAS EXTREMAS
IAH 16: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS SEQUÍAS HABITUALES
IAH 17: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS SEQUÍAS EXTREMAS
IAH 18: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS SEQUÍAS HABITUALES
IAH 19: ÍNDICE DE DURACIÓN DE SEQUÍAS
IAH 20: ÍNDICE DE Nº DE DÍAS CON CAUDAL NULO
IAH 21: ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD DE SEQUÍAS

F ÍNDICES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA EN RÉGIMENES NO COETANEOS: DEFINICIONES

F.1 ÍNDICES DE ALTERACIÓN DE VALORES HABITUALES 93

M 1: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS APORTACIONES ANUALES
M 2: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS APORTACIONES MENSUALES
M 3_{mes i}: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS APORTACIONES DE CADA MES
V 1: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS APORTACIONES ANUALES
V 2: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS APORTACIONES MENSUALES
V 3_{mes}: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS APORTACIONES DE CADA MES
V 4: ÍNDICE DE VARIABILIDAD EXTREMA
E 1: ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD DE MÁXIMOS
E 2: ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD DE MÍNIMOS

F.2 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE ALTERACIÓN GLOBAL EN VALORES HABITUALES..... 100

REFERENCIAS

ANEJO I CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL E INTRANUAL

IAHRIS



ÍNDICES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA EN RÍOS

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

Este trabajo propone un conjunto de índices denominados de Alteración Hidrológica (**IAH**) que permiten evaluar de manera objetiva y eficiente, los cambios que sobre los elementos del régimen de caudales con mayor trascendencia ambiental, inducen los aprovechamientos de los recursos hídricos.

El proceso consta de dos fases principales encaminadas a la caracterización del régimen natural, como estado de referencia, y a la evaluación de la alteración hidrológica gracias a los IAH. El resultado final es la valoración del estatus hidrológico y la diagnosis ambiental del tramo en estudio.

La metodología aquí presentada es también aplicable para identificar los aspectos del régimen de caudales que en mayor medida condicionan la rehabilitación o recuperación de un tramo regulado y para fijar criterios objetivos a la hora de establecer prioridades en la restauración de ecosistemas fluviales.

Se pone pues a disposición de la comunidad científica y de los gestores de los recursos hídricos un instrumento exigido por la Directiva Marco del Agua para la caracterización del estado de las masas de agua.

CUATRO PREGUNTAS para empezar

Índices de alteración hidrológica en ecosistemas fluviales, ¿por qué?

Porque es un hecho por todos conocido que el aprovechamiento de los recursos hídricos de una cuenca lleva implícito una modificación de su régimen de caudales.

Porque esta situación nos lleva a plantearnos las preguntas siguientes: ¿cómo podemos valorar y caracterizar esta alteración? Y sobre todo ¿cómo podemos interpretar sus consecuencias ambientales?

Y porque las metodologías actualmente vigentes para la estimación de alteraciones hidrológicas no están adaptadas a nuestro peculiar ámbito mediterráneo y no recogen explícitamente ciertos aspectos del régimen con fuerte vinculación ambiental.

Índices de alteración hidrológica en ecosistemas fluviales, ¿basados en?

La hipótesis de partida del trabajo aquí presentado es conocida como el Paradigma del régimen de caudales. Según este paradigma, el régimen natural de un río es el factor ambiental que en mayor medida determina la composición, estructura, funciones y dinámica de los ecosistemas fluviales, siendo el principal condicionante de su integridad ambiental.

El **régimen natural de caudales** se constituye por tanto como el **estado de referencia** desde el punto de vista hidrológico para un determinado ecosistema fluvial.

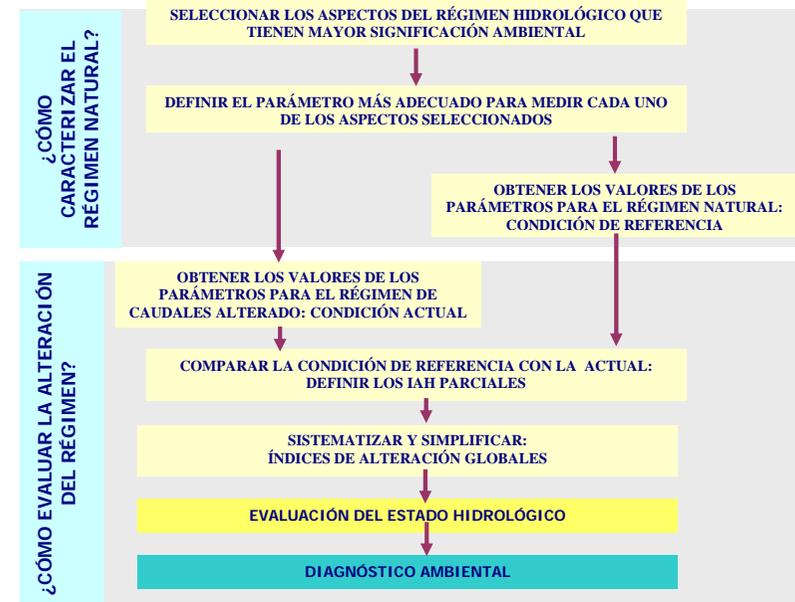
Índices de alteración hidrológica en ecosistemas fluviales, ¿cómo?

Este trabajo propone un conjunto de índices denominados de Alteración Hidrológica (IAH) que permiten evaluar de manera objetiva y eficiente, los cambios que sobre los elementos del régimen de caudales con mayor trascendencia ambiental, inducen los aprovechamientos de los recursos hídricos.

El proceso consta de dos fases principales encaminadas a la caracterización del régimen natural y a la evaluación de la alteración hidrológica gracias a los IAH.

La valoración obtenida con estos índices permite definir el estatus hidrológico y formular la diagnosis ambiental del tramo en estudio.

La figura siguiente resume las principales etapas de la metodología propuesta:



Índices de alteración hidrológica en ecosistemas fluviales, ¿para qué?

Para poder cuantificar objetivamente la alteración que induce el aprovechamiento de los recursos hídricos del río sobre su régimen de caudales.

Para poder valorar la alteración que sobre este régimen producirían distintos escenarios de uso y gestión de los recursos hídricos.

Para poder interpretar las consecuencias ambientales de la alteración del régimen de caudales en la integridad ambiental del río

Para poner a disposición de la comunidad científica y de los gestores de los recursos hídricos un instrumento exigido por la Directiva Marco del Agua para la caracterización del estado de las masas de agua.

Para poder identificar los aspectos del régimen de caudales que en mayor medida condicionan la rehabilitación o recuperación de un tramo regulado.

Y por último para poder fijar criterios objetivos a la hora de establecer prioridades en la restauración de ecosistemas fluviales.

A RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES Y ECOSISTEMA FLUVIAL

A.1. CONCEPTOS BÁSICOS

El régimen natural de caudales de un río (**RNC**) es el resultado de la integración de todos los factores, procesos y sinergias de su cuenca: clima, topografía, geología, suelos, vegetación, tamaño y forma de la cuenca, tipología de la red de drenaje, usos del suelo, etc. (Baker *et al.*, 2004).

Algunos de los factores citados anteriormente se caracterizan por su estabilidad en el tiempo, tal es el caso de la geología. Los usos del suelo, por el contrario, pueden experimentar cambios espectaculares en períodos muy breves, consecuencia de incendios, deforestaciones, o urbanizaciones del terreno. Indudablemente estos cambios afectarán al régimen hidrológico, alterando las pautas de infiltración y escorrentía en la cuenca y traduciéndose en modificaciones en los caudales de avenida, en los tiempos de concentración, etc.

En este trabajo, entendemos como **RNC** el que de forma natural circularía por el cauce, aceptando la complejidad y variabilidad de todos los factores implicados, en contraposición a otros regímenes, a los que podemos denominar alterados, obtenidos al modificar el régimen natural mediante una regulación y/o detención directa de caudales desde el cauce.

Conviene matizar también el significado de ecosistema fluvial, o empleando un término más sencillo, el significado de **río**. Al hablar de un río, nos estamos refiriendo a todos los componentes, funciones y procesos existentes tanto en el cauce como en la zona riparia, la llanura de inundación y el acuífero asociado.

Estos cuatro ámbitos, cauce, ribera, llanura y acuífero, forman un sistema abierto y dinámico, estable en el tiempo, con flujos de materia y energía bidireccionales según tres ejes principales: longitudinal – a lo largo del cauce-, transversal – conectando cauce, ribera y llanura - y vertical – relacionando el cauce con el freático-.

La vinculación entre estos ámbitos y el régimen de caudales es estrechísima, y hoy en día existe un acuerdo casi general dentro de la comunidad científica en afirmar que el **RNC** es el principal agente organizador del ecosistema fluvial: las avenidas extraordinarias y ordinarias, las sequías normales, las sequías extremas y los valores habituales del **RNC**, todos ellos, con sus propias pautas de estacionalidad, duración y variabilidad inter e intranual, se aúnan, se imbrican para dar forma al *paisaje fluvial*.

Cada uno de los rasgos de este *paisaje*, por ejemplo, la anchura del cauce, el tamaño y forma del sedimento, el predominio de macrófitas en un recodo, la riqueza en odonatos de un rápido, las aves que nidifican en un soto, o las truchas que acuden a frezar a un enclave

determinado, pueden estar más fuertemente condicionados por un aspecto concreto del **RNC**, pero es la conjunción de todos ellos, la que conforma el río y modela su biocenosis.

Es tal la complejidad de las interacciones entre el **RNC** y el ecosistema fluvial que su estudio debe ser realizado a diferentes escalas espaciales y temporales (Bunn y Arthington, 2002).

Las ideas que se presentan a continuación sólo pretenden asomar al lector a la increíble ventana de este entramado:

LA IMPORTANCIA DE LA DINÁMICA MORFOLÓGICA



La morfología de un río representa la respuesta del mismo a las entradas de masa -caudal líquido y caudal sólido- y energía -definida por la pendiente del valle sobre el que discurre el cauce-, Fernández Yuste (2003).

El río va ajustando esta energía con la forma en planta, dibujando curvas y meandros, o conformando una sucesión de saltos y pozas en la búsqueda continua de un equilibrio entre la pendiente disponible y el caudal líquido y sólido a transportar.

Las curvas de un río no son formas caprichosas. Responden a una finalidad muy concreta: con el meandro el río consigue que la pendiente real que encuentra el flujo sea inferior a la del valle. Las formas rectas, trezadas y anastomosadas de nuestros ríos son también respuestas en la búsqueda continua de ese equilibrio.

Múltiples variables morfológicas como la anchura del cauce, la superficie mojada, el espacio medio entre rápidos y remansos, la granulometría de los materiales transportados y de los que conforman el lecho, pueden expresarse en función de los caudales circulantes tal y como lo recogen las ecuaciones clásicas de morfología fluvial (Knighton, 1998).

Si bien esta morfología y su dinámica son en sentido estricto la parte abiótica del sistema fluvial, su papel en la definición y conformación de los componentes bióticos es incuestionable pues marca las pautas cuantitativas y cualitativas de su biotopo.

De todos los componentes del **RNC** son los caudales máximos o avenidas los que poseen una mayor significación geomorfológica.

Las avenidas son críticas en la conformación y estabilidad del cauce, manteniendo su morfología en un equilibrio dinámico, tanto en sección como en planta. Los caudales máximos garantizan la conectividad en sentido transversal con la llanura de inundación posibilitando un flujo bidireccional no sólo de agua, también de organismos, sedimentos, propágulos y nutrientes, estimulando la creación y rejuvenecimiento de canales y pozas laterales, la formación de barras, etc.. La magnitud, variabilidad y duración de las avenidas tiene implicaciones en la granulometría de los materiales transportados y sedimentados a lo largo del corredor fluvial, en la remoción del lecho y en el mantenimiento de las transferencias con el freático.



En la mayoría de los casos, la alteración del **RNC** por la regulación de caudales supone la reducción en la magnitud y frecuencia de las avenidas y un cambio en su estacionalidad.

La construcción de la presa Gen Canyon (Colorado, EEUU) en 1963 ha privado de avenidas estacionales a cerca de 430 km de río, entre los cuales se incluye el Parque Nacional del Gran Cañón, pasando de caudales pico de 2400 m³/s por deshielo a tan sólo 500 m³/s, a lo que hay que unir la retención en la presa de casi el 95% de los sedimentos transportados (Collier *et al.*, 1997). Esta alteración del régimen hidrológico y sedimentológico ocasionó la reducción en la proporción de zonas de aguas someras y bajas velocidades necesarias para los peces en su fase juvenil. También la reducción en los caudales punta propició la expansión de la vegetación riparia en zonas sometidas anteriormente a fuertes erosiones, estrechándose el cauce y aumentando progresivamente la expansión de especies foráneas (*Tamarix sp.*). Tras la implementación en 1996 de un régimen de avenidas (un 35% de la avenida natural de primavera) se constató un incremento en el tamaño de las barras y zonas de arena con los consiguientes efectos secundarios en la fauna y la vegetación.

La regulación del río Danubio mediante dos grandes presas (Pinay *et al.*, 2002) ha originado graves problemas de estabilización del cauce, acentuándose los procesos erosivos hasta 1000 km aguas abajo, desestabilizándose el régimen sedimentológico del cual dependía la dinámica del delta que a raíz de ello sufre un continuo proceso de erosión por las corrientes del Mar Negro.

LA IMPORTANCIA DE LA DIVERSIDAD DE HÁBITATS

En un río diversidad hidráulica es sinónimo de biodiversidad.

Los diferentes hábitats existentes (Richter y Richter, 2000), han sido creados por un amplio abanico de caudales. De este modo, la diversidad inter e intranual del **RNC** garantiza la diversidad biótica, su dinamismo y permanencia.



Así las avenidas de pequeña magnitud son fundamentales para asegurar los procesos de limpieza y revitalización del sustrato, mantener unas adecuadas condiciones en el medio hiporreico, asegurar su diversidad granulométrica y la secuencia rápido-remanso en el eje fluvial.

También son importantes los caudales extraordinarios con recurrencia de décadas o periodos superiores, los cuales pueden arrancar árboles y transportar grandes restos vegetales, que una vez depositados en el cauce contribuyen a mantener la diversidad hidráulica y a la creación de hábitats cruciales para muchas especies (Gippel, 1995).



Los valores mínimos del **RNC** también juegan un papel decisivo a nivel de microhábitat en tanto que pueden afectar a la potencialidad del medio hiporreico, a sus condiciones hidráulicas y a la calidad del agua. Estos caudales mínimos pueden llegar a limitar la transitabilidad longitudinal en el río y propiciar condiciones críticas a las que sólo las especies nativas están adaptadas. De este modo, los valores más extremos del RNC funcionan como barrera frente a la intromisión de especies más eurióicas.

Las relaciones entre granulometría, flujo y biota son múltiples. La velocidad del agua en la proximidad del lecho, los esfuerzos cortantes, la turbulencia y la estabilidad son los factores de mayor trascendencia desde el punto de vista biológico, condicionando la abundancia y diversidad del bentos y de la ictiofauna dependiente (Sedimentation Committee, 1992). Aunque los requerimientos varían con la edad y especie, las características granulométricas son cruciales para los peces en fases tan críticas como la freza y el alevinaje.

La regulación por embalses puede alterar la dinámica natural de transición en el lecho del cauce, afectando a la distribución relativa de un hábitat frente a otro, a su estabilidad o a las

características del medio hiporreico, fundamentalmente por sedimentación o colmatación de los huecos intersticiales. En otras ocasiones, la regulación del régimen produce un acorazamiento por falta de caudales de envergadura suficiente para movilizar los elementos más gruesos. La consecuencia final de todo ello, es la afección al eslabón primario en la cadena trófica de un río, el bentos, que ve reducido su hábitat disponible.

Steinbacher (2003) ha estudiado los efectos de la alteración del régimen de caudales sobre la heterogeneidad del hábitat: en general la regulación inducida por una presa supone una pérdida de variabilidad que se traduce en el declive de muchas especies acuáticas y riparias.

En Willamette River (EEUU) el bosque ripario vio reducida su extensión de 250 a 64 km en unos 100 años. Esta alteración fue crítica para el funcionamiento del río, pues la vegetación regulaba la erosión y la sedimentación, la entrada de nutrientes, la calidad del agua y la productividad del ecosistema. La pérdida del bosque ripario supuso la pérdida de hábitat para muchas especies existentes en la zona y la pérdida de biodiversidad para el río.

LA IMPORTANCIA DE LA SINCRONÍA CON LOS CICLOS VITALES

Muchos procesos vitales se producen como respuesta a unas condiciones ambientales de



sincronía entre temperatura, duración del día y condiciones hidrológicas, de modo que una alteración en el régimen que rompa dicha armonía puede impactar negativamente sobre la biota.

Respecto a ciertas avenidas es crucial el momento del año en que se producen, pues actúan como llamada para la reproducción de muchas especies: Bunn y Arthington (2002)

recogen como en amplias llanuras de inundación, muchas especies acuáticas, desde macroinvertebrados, zooplancton, fitoplancton y peces, son "avisadas" por los caudales extraordinarios, emergiendo desde sus estadios de reposo en respuesta a este aumento en la cota de lámina de agua.

Poff *et al.* (1997) constatan como en Arizona la alteración en la estacionalidad de los caudales, desde primavera a verano, época donde en tramos regulados se requieren mayores detracciones para riego, ha supuesto que los caudales punta tengan lugar después de la germinación y no antes (como sucedía en régimen natural), perjudicando la regeneración de la especie nativa *Populus fremontii* y favoreciendo a aquellas exóticas como *Tamarix sp.*, con requerimientos menos específicos.

La duración de las inundaciones también es crítica pues determina cómo y durante



cuanto tiempo está garantizada la conectividad longitudinal y transversal. Según la duración de estos eventos, los peces pueden acceder a lugares de cría y retornar al cauce principal o quedar aislados en pequeñas pozas. El aislamiento en enclaves desconectados del curso principal puede suponer tasas altas de mortalidad, pues las características físico-químicas del agua se deterioran, los recursos

alimenticios escasean y la presión de los predadores se incrementa.

Son conocidas las diferentes tolerancias de muchas especies vegetales a la duración de las inundaciones (stress por anoxia, Kozłowski, 1984) y de las comunidades de macroinvertebrados y peces a la duración de la sequía (Poff *et al.*, 1997). Richter y Richter (2000) establecen para el río Yampa (EEUU) relaciones entre duración y magnitud de las inundaciones para que no se produzcan cambios sustanciales en la dinámica del bosque ripario. Pinay *et al.*, (2002) constatan las relaciones existentes entre la duración, magnitud y frecuencia de las avenidas y sequías y el ciclo del nitrógeno, dado que los procesos implicados son muy sensibles al nivel de oxido-reducción existente en el suelo.

Strange *et al.* (1999) recoge como en South Platte River (EEUU), las avenidas promueven la dispersión de las semillas de *Populus deltoides*, las cuales son viables durante un corto periodo de tiempo requiriendo unas condiciones de humedad adecuadas en el suelo, no tolerando la cubierta y necesitando alcanzar un crecimiento radical lo suficientemente profundo para garantizar su supervivencia cuando el nivel freático descienda. Tras la regulación del tramo y la consiguiente afección al régimen de avenidas se observó la proliferación de especies introducidas como *Eleagnus angustifolia*, más tolerante a la sombra. Además su diseminación se produce durante el verano y las semillas mantienen su capacidad germinativa durante meses en un amplio rango de condiciones de humedad y cubierta. También se hace constar la expansión de *Tamarix spp.*, poseedoras de un sistema radical potente que las hace menos vulnerables frente al descenso del freático debido a la regulación.

Los efectos en cascada son difíciles de predecir y esta alteración del bosque ripario afectó indirectamente a las comunidades que lo habitaban: en South Platte River (EEUU) se constató la pérdida de al menos cuatro especies autóctonas de aves por hibridación con congéneres exóticos. Las causas pueden ser múltiples y estrechamente relacionadas: pérdida de lugares adecuados para la nidificación, desaparición de ciertas especies de insectos que constituían el alimento principal, etc.

Las tasas de crecida y defluencia de los caudales circulantes deben también guardar sincronía con la capacidad de respuesta de los organismos. Arthington (2002) señala hasta un 14% de pérdida de biomasa en la comunidad béntica por bruscos incrementos de caudal.

En Haweai River (Nueva Zelanda) Jowett (2000) señala como bruscas detecciones de caudal produjeron un detrimento del 40-90% en la abundancia de todos los grupos taxonómicos de macroinvertebrados, excepto en *Mollusca* que experimentó un crecimiento de hasta el 30%.

Un apartado especial merece la alteración que se produce como consecuencia de la regulación de caudales en el régimen de temperaturas y nutrientes y sus efectos en la biología de muchas especies. Esta situación es claramente perceptible aguas abajo de grandes presas con nivel de descarga bajo el hipolimnion, o donde el retorno de aguas de riego o residuales, ricas en nutrientes, favorecen a unas especies en detrimento de otras (Strange *et al.*, 1999; Pinay *et al.*, 2002).

LA IMPORTANCIA DE LA COMPETENCIA NO EXCLUYENTE

Es un hecho que las especies autóctonas evolucionan en respuesta a las características del RNC. Por consiguiente en aquellos tramos con regimenes alterados es fácil que se produzca un desplazamiento de las especies autóctonas por otras menos exigentes o restrictivas.



Cobo (2000) fundamenta la estabilidad de los ríos en su complejidad física y biológica. Si esta complejidad se rompe o empobrece, el sistema se hace cada vez más inestable y alteraciones que antes eran fácilmente amortiguadas pueden vencer ahora la capacidad de homeostasis del ecosistema produciendo daños irreversibles.

Naiman *et al.* (2002) ofrece datos alarmantes en Mobile River (EEUU) donde 16 especies de moluscos nativos están prácticamente extinguidas como consecuencia de la regulación.

A.2. EL PARADIGMA DEL RÉGIMEN DE CAUDALES

El nivel de conocimiento actual permite por tanto concluir que el régimen 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):

- El régimen natural de caudales es el principal agente **estructurador del hábitat físico**, el cual a su vez condiciona la riqueza y diversidad en especies.
- Las alteraciones en el régimen natural de caudales pueden suponer la **alteración en los ciclos de vida** de numerosas especies.
- El mantenimiento de la **conectividad longitudinal y transversal** es fundamental para garantizar la dinámica poblacional y la supervivencia del ecosistema.
- La alteración del régimen natural favorece la **intromisión** y el éxito en el establecimiento de **especies exóticas**.

Poff *et al.* (1997) en el denominado **paradigma del régimen natural de caudales** sintetiza brillantemente estas ideas:

“ el rango completo de variación intra e interanual del régimen hidrológico con sus características asociadas de estacionalidad, duración, frecuencia y tasa de cambio, son críticas para sustentar la biodiversidad natural y la integridad de los ecosistemas acuáticos” (Figura nº 1):

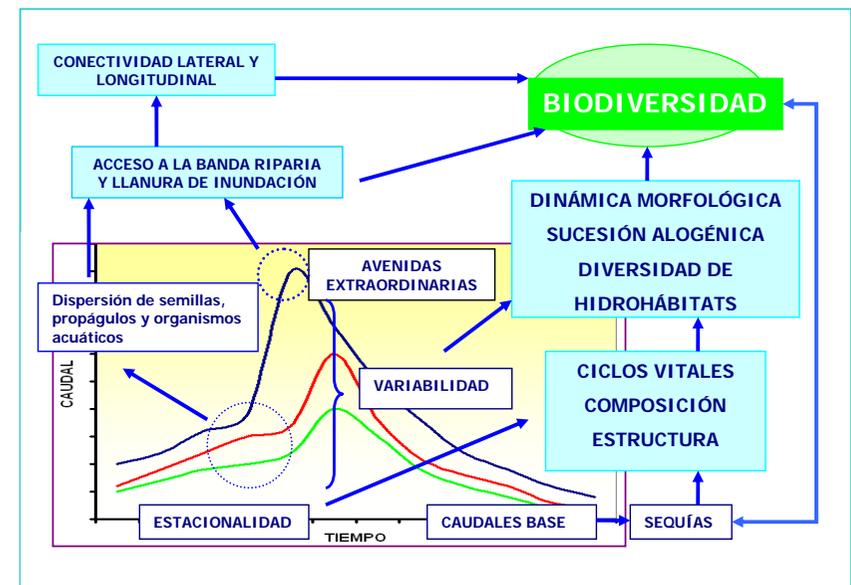


Figura nº 1.- Paradigma del régimen natural de caudales (basado en Bunn y Arthington, 2002)



No obstante aunque el papel de la hidrología en la generación de biodiversidad es conocido y aceptado, su aplicación en los programas de restauración es aún muy restringida.

En zonas húmedas, Fredrickson (1997) presenta diversas propuestas para gestionar los recursos hídricos en coordinación con la vegetación y fauna silvestre siempre teniendo en cuenta aspectos como la estacionalidad, magnitud y duración de las avenidas.

Poff *et al.* (1997) citan múltiples ejemplos donde la restauración de alguno de los componentes del régimen natural han ayudado a mejorar tanto los procesos físicos como biológicos del ecosistema:

En el río Oldman (Canadá), la restauración de caudales máximos con defluencias que imitan las naturales ha favorecido la recuperación de la banda riparia (Rood *et al.*, 1995)

En el río Ranoke (EEUU) la amortiguación de las oscilaciones de caudal producidas por las hidroeléctricas ha incrementado la presencia de juveniles de especies nativas (Rulifson y Manooch, 1993)

En el río Pekos (EEUU) la simulación de avenidas de corta duración a raíz de las tormentas de verano ha beneficiado las tasas reproductivas de las especies autóctonas (Robertson, 1997)

En el río Grande (EEUU) la restauración de avenidas de gran magnitud que acceden a la llanura de inundación mejoró el ciclo del nitrógeno y la transferencia de nutrientes (Molles *et al.*, 1995)

Por consiguiente, el éxito en la conservación de la biodiversidad y funcionalidad de nuestros ríos depende de la capacidad de proteger o restaurar los principales aspectos del **RNC** (Arthington, 1997; Poff *et al.*, 1997; Richter *et al.*, 1998) y de conocer como las variables hidrológicas e hidráulicas interactúan con los procesos biológicos controlando la composición en especies y la funcionalidad de los distintos componentes del ecosistema.

Hoy en día el principal desafío científico-administrativo es buscar unos protocolos de manejo y gestión del agua que respeten, dentro de unos niveles, los rangos de variabilidad del **RNC** en lo que Poff *et al.* (1997) definen como **una diversidad predecible**.

A.3. LA ALTERACIÓN DEL RNC COMO INDICADOR DEL ESTADO DEL ECOSISTEMA FLUVIAL

En el año 2000 se publicó la Directiva Marco de Aguas (**DMA**) Directiva 2000/60/CE, de 23 de octubre de 2000. Esta Directiva ha supuesto una revolución conceptual respecto a los criterios clásicos de gestión de los recursos hídricos, al plantear como objetivo prioritario la salvaguarda del buen estado ecológico de los ecosistemas vinculados a ellos. Para este fin se hace necesario disponer de protocolos que permitan calificar de manera objetiva, ajustada y eficiente el estado ecológico de ríos, lagos y humedales.

Aceptada la hipótesis del paradigma del régimen de caudales, es inmediato concluir que cualquier intento de analizar el estado de los ecosistemas fluviales debe pasar inexcusablemente por un conocimiento detallado de la alteración del RNC.

La DMA exige, para caracterizar el estado de los ríos, utilizar criterios biológicos, químicos, morfológicos e hidrológicos. Se hace necesario por tanto disponer de una herramienta que permita conocer cómo es el régimen natural (condición de referencia) y a partir de este conocimiento evaluar la distorsión que en términos hidrológicos genera cualquier otro régimen distinto a este.

La **Figura n°2** ilustra con claridad esta necesidad, este objetivo.

En dicha figura se representa el hidrograma del río Green (EEUU) entre los años 1930-2000. La construcción de una presa en 1963 alteró por completo las pautas de su régimen natural que presentaba unas características propias, muy definidas, en lo que respecta a avenidas y sequías. El carácter más distintivo era la alternancia de un periodo seco más o menos extremo (de octubre a mayo) con un periodo húmedo asociado a avenidas de considerable magnitud durante el resto del año.

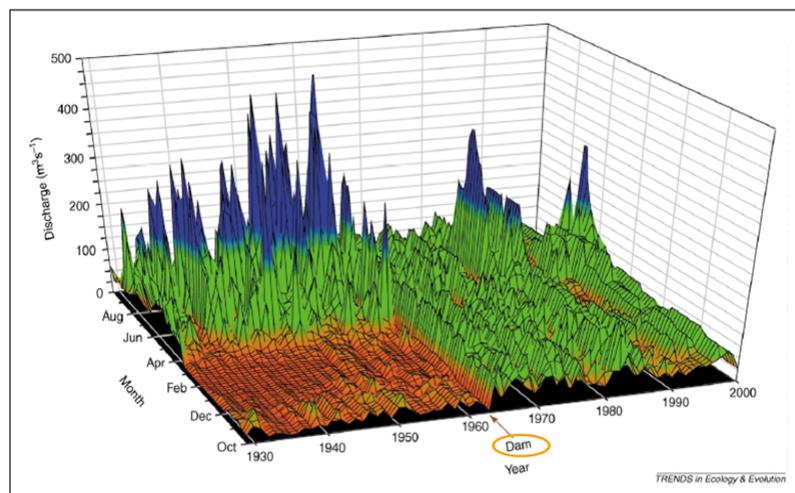


Figura nº 2.- Hidrograma correspondiente al río Green (USA) en el período 1930-2000 (tomada de Lytle y Poff, 2004)

La construcción de la presa alteró por completo las pautas observadas, tanto para avenidas como para sequías, induciendo un nuevo régimen que ni en estacionalidad, magnitud ni frecuencia, guardaba ninguna similitud con el natural. Grandes presas como la de la figura existen más de 45000 a nivel mundial (Gupta, 1998), de las cuáles unas 1200 se encuentran en España (Magdaleno, 2005), donde la acusada mediterraneidad de su régimen de precipitaciones motiva la necesidad de regular los recursos hídricos como garantía de diversos usos y actividades.

Si como se ha comentado, todos los componentes, funciones y procesos del ecosistema fluvial están determinados por las características del régimen natural, ¿que alteraciones sobre el ecosistema se producirán como consecuencia de la puesta en servicio de una presa? Esta pregunta, ambiciosa en esencia, puede ser desglosada en las siguientes cuestiones parciales:

¿Cómo podemos evaluar en términos hidrológicos la alteración inducida por el nuevo régimen de caudales?

¿Cuál es la sensibilidad del ecosistema frente a estas alteraciones?

¿Es posible establecer relaciones entre el agente causante y el efecto?

¿Son consistentes estas relaciones?

¿Pueden estas relaciones ayudar a predecir cambios en el ecosistema bajo distintas hipótesis de regulación de caudales?

Ni en España ni en el resto de Europa se dispone de un procedimiento que permita hacer una valoración objetiva de la alteración producida por el aprovechamiento de los recursos hídricos

de la red fluvial, y los índices habitualmente utilizados en EEUU (Richter *et al.*, 1996; 1997; 1998) no contemplan sin embargo las peculiaridades del régimen mediterráneo.

Aceptado el paradigma del régimen de caudales, es coherente evaluar los efectos ambientales que se producen en tramos regulados, valorando la alteración que ha tenido lugar sobre el régimen natural de caudales y/o la que se produciría al considerar diferentes escenarios de usos y gestión de los recursos hídricos.

Con estos antecedentes, y con el fin de establecer una metodología de caracterización del régimen de caudales y de evaluación de la alteración inducida respecto al régimen natural por cualquier otro régimen circulante, se presenta este trabajo, cuyos objetivos parciales se resumen en:

- Seleccionar los **aspectos** del régimen de caudales con mayor significación ambiental.
- Seleccionar los **parámetros** y variables que permitan caracterizar estos aspectos.
- Definir un conjunto de **índices** que comparen los valores de los parámetros entre las distintas situaciones: régimen natural *versus* régimen alterado y régimen natural *versus* los regímenes correspondientes a los distintos escenarios que sirvan para llegar a definir el régimen ambiental propuesto.
- Deducir las implicaciones ambientales de las alteraciones evaluadas

B CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES

B.1 ASPECTOS DEL RNC CON MAYOR SIGNIFICACIÓN AMBIENTAL

Cada sistema fluvial, y más concretamente cada tramo de río, posee un régimen de caudales propio responsable de sus rasgos, que mantiene su hábitat físico, su diversidad biológica y sus procesos ecológicos.

A la hora de determinar los aspectos de este régimen que poseen mayor significación ambiental, la comunidad científica ofrece también una opinión generalizada en la selección de la magnitud, frecuencia, estacionalidad, duración y tasas de cambio del régimen natural como los aspectos más significativos (Arthington, 1997; Poff *et al.*, 1997;; Richter *et al.*, 1998:)

- **Magnitud:** ya que determina la **disponibilidad** general de agua en el ecosistema.
- **Frecuencia** con la que un evento se produce en un intervalo de tiempo dado: indicativa de la variabilidad en el régimen de caudales y condicionante de la dinámica geomorfológica y ecológica y por ende de la **diversidad**.
- **Duración** o intervalo de tiempo asociado con unas determinadas condiciones de flujo: en situaciones extremas, avenidas y sequías, la duración está íntimamente ligada a los **umbrales de resiliencia** de las diferentes especies.
- **Estacionalidad:** o regularidad con la que ese evento acontece en una época determinada del año. Es un aspecto vinculado estrechamente y en **sincronía** con los ciclos de vida de las especies (fluviales, de estuarios y marinas).
- **Tasas de cambio:** referente a la rapidez con la que se producen los cambios de unas magnitudes a otras, afectando a la **capacidad de respuesta** de la biota.

Estos cinco componentes permiten caracterizar el régimen natural y evaluar en base a ellos la distorsión que cualquier otro régimen distinto del natural producirá en el ecosistema.

Las definiciones anteriormente expuestas nos permiten intuir la trascendencia ambiental del régimen de caudales. Así entendido, un alteración en la magnitud de los caudales circulantes supondrá una alteración en la disponibilidad de hábitat para los organismos dependientes de ese régimen, y una alteración en la estacionalidad de ciertos eventos inducirá un desajuste con los procesos biológicos dependientes. Conocer el régimen de caudales en los aspectos de magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasa de cambio es conocer sus posibilidades respecto a

disponibilidad de hábitat, diversidad, capacidad de resiliencia y de respuesta y sincronía con los ciclos vitales (**Figura n° 3**):

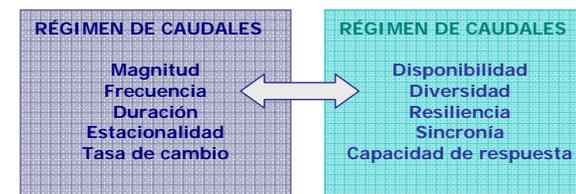


Figura n° 3.- Aspectos hidrológicos del régimen de caudales y su correspondencia en términos biológicos

En esta caracterización del régimen de caudales debe prestarse un interés preferente a los eventos extraordinarios, avenidas y sequías, por ser componentes con una importancia estratégica en el mantenimiento y dinámica del ecosistema.

Es por ello que el proceso de caracterización del régimen natural de caudales se ha realizado en dos vías paralelas:

- atendiendo a los **valores medios o habituales** como determinantes de la disponibilidad general de agua en el ecosistema.
- atendiendo a los **valores extremos** de dicho régimen: máximos -avenidas- y mínimos –sequías- al representar las condiciones ambientalmente más críticas.

A su vez, cada uno de estos componentes debe ser analizado en aquellos aspectos ambientalmente significativos.

La caracterización de los valores habituales se realizará en dos marcos temporales, (año y mes) y cuando la disponibilidad de datos lo permita, podrá llevarse a cabo la caracterización diaria o a intervalos horarios.

La **Tabla n° 1** recoge los aspectos que serán objeto de evaluación para cada uno de los componentes citados.



COMPONENTE DEL RÉGIMEN NATURAL		ASPECTO
VALORES HABITUALES	Valores anuales y mensuales	<ul style="list-style-type: none"> ▫ Magnitud ▫ Variabilidad ▫ Estacionalidad
	Valores diarios o a intervalos horarios	<ul style="list-style-type: none"> ▫ Variabilidad ▫ Fluctuaciones diarias
VALORES EXTREMOS	Valores máximos (avenidas)	<ul style="list-style-type: none"> ▫ Magnitud y frecuencia ▫ Variabilidad ▫ Estacionalidad ▫ Duración ▫ Tasas de crecida y defluencia
	Valores mínimos (sequías)	<ul style="list-style-type: none"> ▫ Magnitud y frecuencia ▫ Variabilidad ▫ Estacionalidad ▫ Duración

Tabla n° 1.- Componentes del régimen de caudales y principales aspectos con significación ambiental

B.2 PARÁMETROS PROPUESTOS

El proceso de caracterización del régimen natural se concreta en la selección de parámetros adecuados que permitan evaluar de forma clara y precisa cada uno de los aspectos anteriores.

En la **Tabla n° 2** se recogen los 19 parámetros (**P1-P19**) que permiten la caracterización del régimen natural de caudales y que pueden ser obtenidos con IAHRIS v1.0.

Estos 19 parámetros se completan con la caracterización de dos aspectos más (cuyo cálculo no incluye la vigente VERSIÓN de IAHRIS):

1. La fluctuación diaria obtenida a partir de datos de caudales a intervalos horarios o menores.
2. Las tasas de crecida y decrecida de las venidas, tasas que deben obtenerse para los diferentes tipos de avenidas consideradas en este trabajo.

En epígrafes posteriores se expone el procedimiento a seguir para la caracterización de estos dos aspectos.

Respecto a los 19 parámetros presentados en la **Tabla n° 2** pueden hacerse las consideraciones siguientes:

- La aplicación calcula los **19 parámetros** aquí propuestos para:
 - cualquier régimen calificado como natural
 - también cualquier régimen calificado como alterado, siempre que se haya introducido la serie natural coetánea
- Para la situación particular de caracterización de una serie alterada sin disponer de la natural coetánea, se procederá según lo especificado en el epígrafe B.3 de este Manual.
- Los parámetros **P1, P2, P3 y P4** aparecen desglosados por tipo de año, ofreciéndose también como resultado global el valor correspondiente al "año ponderado"

Elo exige la caracterización independiente de estos parámetros, para cada uno de los tipos de año considerados.

Por ejemplo, para estimar P1 se calculan: P1 húmedo, P1 medio, P1 seco, que caracterizan respectivamente los años húmedos, medios y secos.

Estos tres valores concluyen en uno único, P1, obtenido al ponderar según el porcentaje de presencia de cada tipo de año en la serie

$$P1 = 0,25 * (P1 \text{ húmedo} + P1 \text{ seco}) + 0,50 * P1 \text{ medio}$$
- Los parámetros **P12, P18, y P19** aparecen especificados a nivel mensual

- Según la periodicidad de los datos facilitados, la aplicación calcula:
 - el total de parámetros **P1-P19**, si se han facilitado datos diarios
 - **P1-P3** , si sólo se han facilitado datos mensuales



Tabla nº 2: RELACIÓN DE PARÁMETROS (P1-P19) PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN DE CAUDALES

COMPONENTE DEL RÉGIMEN		ASPECTO	PARÁMETRO	
VALORES HABITUALES	APORTACIONES ANUALES Y MENSUALES	MAGNITUD	Media de las aportaciones anuales	Por tipo de año año húmedo año medio año seco AÑO PONDERADO (P1)
		VARIABILIDAD	Diferencia entre la aportación mensual máxima y mínima en el año	Por tipo de año año húmedo año medio año seco AÑO PONDERADO (P2)
		ESTACIONALIDAD	Mes de máxima y mínima aportación del año	Por tipo de año (P3) año húmedo año medio año seco
	CAUDALES DIARIOS	VARIABILIDAD	Diferencia entre los caudales medios correspondientes a los percentiles de excedencia del 10% y 90%	Por tipo de año (P4) año húmedo año medio año seco
VALORES EXTREMOS	VALORES MÁXIMOS de caudales diarios (AVENIDAS)	MAGNITUD Y FRECUENCIA	Media de los máximos caudales diarios anuales Caudal Generador del Lecho Caudal de conectividad Caudal de la avenida habitual (Q5%)	Qc (P5) QGL (P6) QCONEC (P7) Q 5% (P8)
		VARIABILIDAD	Coeficiente de variación de máximos caudales diarios anuales Coeficiente de variación de la serie de avenidas habituales	CV (Qc) (P9) CV (Q 5%) (P10)
		DURACION	Máximo nº de días consecutivos al año con $q > Q 5\%$	Duración avenidas (P11)
		ESTACIONALIDAD	Nº medio de días al mes con $q > Q 5\%$	12 valores (uno para cada mes) (P12)
	VALORES MÍNIMOS de caudales diarios (SEQUÍAS)	MAGNITUD Y FRECUENCIA	Media de los mínimos caudales diarios anuales Caudal de la sequía habitual (Q 95%)	Qs (P13) Q 95% (P14)
		VARIABILIDAD	Coeficiente de variación de mínimos caudales diarios anuales Coeficiente de variación de la serie de sequías habituales	CV (Qs) (P15) CV (Q 95%) (P16)
		DURACION	Máximo nº de días consecutivos al año con $q < Q 95\%$ Número medio de días al mes con caudal diario nulo	Duración sequías (P17) 12 valores (uno para cada mes) (P18)
		ESTACIONALIDAD		12 valores (uno para cada mes) (P19)

En los epígrafes siguientes (B.2.1 *caracterización de valores habituales*, B.2.2 *caracterización de avenidas*, B.2.3 *caracterización de sequías* y B.2.4 *caracterización de valores habituales en regímenes alterados no coetáneos*) se presentan con detalle los parámetros propuestos, siguiendo el siguiente esquema general:

ASPECTO a medir	Esquema con el que se presentan cada uno de los parámetros seleccionados
a) Significación ambiental: se detallan las principales influencias que el aspecto considerado tiene sobre el ecosistema fluvial.	
b) Parámetro propuesto: Se nombra y define el parámetro propuesto, indicando con detalle el método de cálculo.	
c) Referencias: Se presentan las citas más destacadas relacionadas con el aspecto analizado, el parámetro propuesto y, en su caso, el método de cálculo.	

En ciertas ocasiones, debido a la complejidad, tanto en el tiempo como en el espacio del aspecto a estudiar, se hace necesario asignar varios parámetros que cubran la multiplicidad del aspecto a tratar.

Como ejemplo de esta situación puede citarse la parametrización de la magnitud de los caudales máximos:

Tomando como referencia la **Figura nº 4** y siguiendo a Poff *et al.* (1997), puede establecerse una correlación directa entre diferentes niveles de flujo y su funcionalidad a nivel geomorfológico y biológico.

El primer nivel (A), estaría definido por los caudales base, donde la presencia del freático garantiza el aporte de agua incluso en épocas de nulas precipitaciones.

El nivel superior al anterior (B), correspondería a avenidas de pequeña magnitud, con periodicidad anual o menor, de ahí que en este trabajo se las haya denominado como *avenidas habituales*. Su funcionalidad a nivel biológico es importantísima pues transportan los sedimentos más finos, limpiando el sustrato y garantizando la potencialidad biológica del medio hiporreico.

Las avenidas asociadas a caudales mayores (nivel C), denominadas *avenidas geomorfológicas*, mantienen en equilibrio dinámico la morfología del cauce, tanto en sección como en planta. Pero también llevan asociadas una funcionalidad biológica, pues favorecen el intercambio de materia orgánica y sedimentos en la franja comprendida entre el nivel de aguas altas y bajas y posibilitan la regeneración y persistencia de la banda riparia.

Por último, las avenidas de magnitudes superiores a las anteriores (niveles D y E), con recurrencia del orden de décadas, rebasan el cauce y acceden a la llanura de inundación

favoreciendo la conectividad cauce-llanura, en un flujo bidireccional, de ahí su denominación de *avenidas de conectividad*. La existencia de estas avenidas garantiza todos los procesos biológicos dependientes de este intercambio (crecida y decrecida) de agua, sedimentos, organismos, semillas, propágulos, etc.

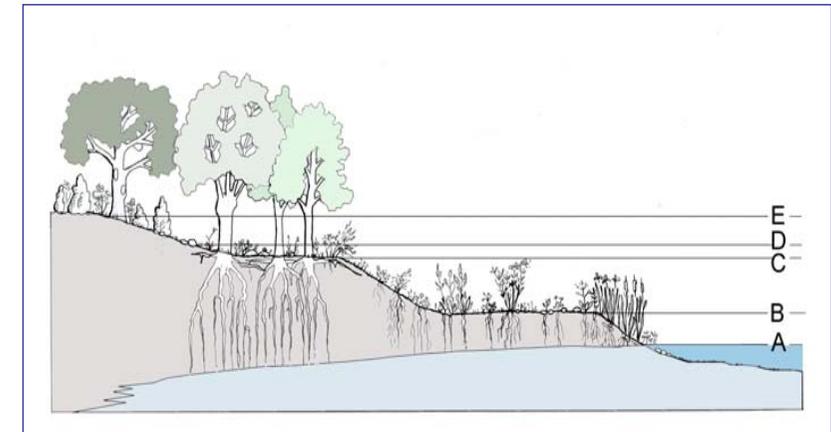


Figura nº 4.- Funcionalidad ecológica y geomorfológica correspondiente a diferentes niveles de flujo (basado en Poff *et al.*, 1997). Dibujo de J. I. García Viñas.

B.2.1. CARACTERIZACIÓN DE VALORES HABITUALES

La caracterización de los valores habituales persigue la parametrización de los valores no extremos del régimen de caudales. Este proceso se llevará a cabo en tres escalas de tiempo complementarias entre sí: año, mes y día.

Los datos de partida necesarios son las series completas de aportaciones anuales y mensuales más largas disponibles y los caudales medios diarios correspondientes a n años, recomendándose $n \geq 15$. La disponibilidad de datos de caudal a intervalos horarios posibilita la caracterización de la variabilidad o fluctuación absoluta intradía (**Figura nº 5**).

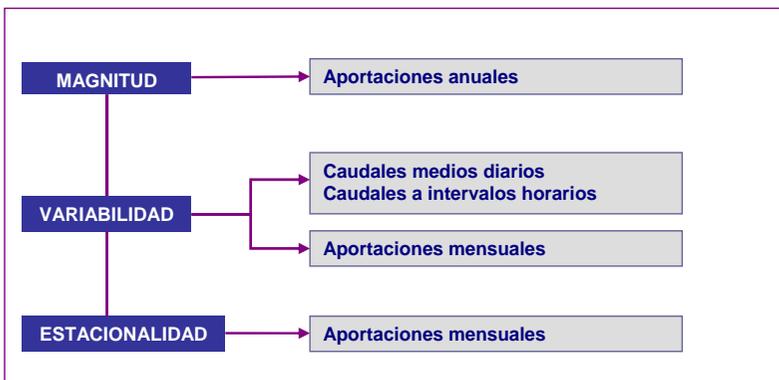


Figura nº 5- Variables empleadas en la caracterización de los valores habituales del régimen de caudales

Con el objeto de evitar que la variabilidad interanual (característica climática muy acusada en nuestro ámbito mediterráneo) quede enmascarada al trabajar con valores medios calculados sobre la globalidad de los años disponibles, se propone realizar una discriminación previa de los años en base a su aportación anual en tres tipos, denominados "año húmedo", "año medio" y "año seco". Con ello se consigue una caracterización del régimen en lo que respecta a su variabilidad interanual.

El proceso a seguir en esta discriminación en tipos se expone en el ANEJO I. En dicho Anejo se especifica el umbral definitorio de cada tipo de año y su porcentaje de presencia en la serie, concluyendo lo siguiente:

- ✚ Un año será considerado **HÚMEDO** si su aportación anual en régimen natural es superior a la aportación correspondiente al percentil de excedencia del 25%
- ✚ Un año será considerado **MEDIO** si su aportación anual en régimen natural está comprendida entre las aportaciones correspondientes a los percentiles de excedencia del 25% y 75%
- ✚ Un año será considerado **SECO** si su aportación anual en régimen natural es inferior a la aportación correspondiente al percentil de excedencia del 75%
- ✚ Respecto al % de presencia de cada tipo en la serie y aceptando la muestra como representativa del comportamiento de la variable "aportaciones anuales", en cualquier otra muestra los años "medios" aparecerán, como promedio, en el 50% de los casos, mientras que los "húmedos" y "secos" tendrán una presencia media del 25%

Establecidos estos umbrales y trabajando con una serie de n años en régimen natural, cada año según su aportación anual podrá adscribirse a un tipo determinado. Ello permite

disponer de tres series en régimen natural (serie de años húmedos, medios y secos), a partir de las cuales se realizará la caracterización del régimen en sus valores habituales.

El proceso expuesto en el Anejo I permite por último caracterizar la variabilidad intranual para cada tipo de año. El resultado final es una caracterización inter e intranual del régimen natural como la recogida en la **Tabla nº 3**

APORTACIONES MEDIANAS MENSUALES (hm ³)			
tipo de año mes	HÚMEDO	MEDIO	SECO
Octubre	14,22	2,08	0,87
Noviembre	37,03	6,23	1,35
Diciembre	30,05	16,70	3,58
Enero	33,07	15,44	7,50
Febrero	49,76	18,13	5,50
Marzo	40,45	23,19	8,20
Abril	36,78	15,26	12,07
Mayo	26,51	11,61	7,14
Junio	15,40	6,29	2,70
Julio	4,26	2,09	0,80
Agosto	2,10	1,09	0,50
Septiembre	2,80	1,41	0,69

Tabla nº 3- Ejemplo de caracterización de la variabilidad intra e interanual del régimen de caudales

B.2.1.1.- VALORES ANUALES Y MENSUALES

MAGNITUD

a) Significación ambiental: las aportaciones anuales y mensuales no están asociadas a una específica función geomorfológica o ecológica, pero sí que son determinantes en la disponibilidad general de agua en el ecosistema (Richter *et al.*, 1995; Brizga *et al.*, 2001). Es interesante recoger las matizaciones que Richter *et al.* (1998) realizan sobre el significado ambiental de las aportaciones mensuales:

- disponibilidad de hábitat para los organismos acuáticos
- contenido de humedad en el suelo para las plantas
- disponibilidad de agua para los animales terrestres

- accesibilidad a los lugares de cría
- influencia en la temperatura, contenido de oxígeno y actividad fotosintética en la columna de agua

b) Parámetro propuesto: P1: **MEDIA DE LAS APORTACIONES ANUALES**

Referente a valores anuales se calcula para cada tipo de año el promedio de las aportaciones anuales correspondientes. El estimador final se obtendrá ponderando el valor obtenido según el porcentaje de presencia de cada tipo de año en la serie.

c) Referencias: El uso de la media como estimador de las aportaciones anuales aparece recogido en Clausen *et al.* (2000), Brizga *et al.* (2001) y Batalla *et al.* (2004). Otros autores, Hughes y James (1989) utilizan la escorrentía media anual. Citar también que Brizga *et al.* (2001) realizan estimaciones de magnitud en base a la mediana y a estimaciones conjuntas de magnitud y estacionalidad.

En las referencias consultadas sólo se constata el empleo del caudal medio diario (media o mediana) de la serie disponible para la caracterización de valores mensuales: Richter *et al.* (1995), Clausen *et al.* (2000) y Grown y Marsh (2000).

Por último, conviene matizar que todos los trabajos revisados utilizan la serie completa de años disponible, sin realizar la discriminación previa aquí propuesta en diferentes tipos de año.

VARIABILIDAD

a) Significación ambiental: Son múltiples las referencias existentes a la acusada significación ambiental de la variabilidad del régimen de caudales. Entre otras, se recogen las siguientes:

- La variabilidad es el eje conductor de la dinámica geomorfológica y ecológica, condicionando los procesos de expansión y contracción del cauce y las pautas de comportamiento de la biota animal y vegetal (Brizga *et al.*, 2001).
- Una disminución en la variabilidad puede favorecer la intromisión y expansión de especies exóticas (Poff *et al.*, 1997).
- La similitud en los valores medios mensuales a lo largo del año puede interpretarse como indicativo de **constancia** hidrológica, mientras que la variación interanual del valor medio para un mes dado, es indicativo de la **contingencia** ambiental (Richter *et al.*, 1995). Ambos aspectos garantizan la

predictibilidad de los eventos por parte de la ictiofauna (González del Tánago y García Jalón, 1995).

- La variabilidad del régimen de caudales condiciona la heterogeneidad del hábitat hiporréico y su calidad, influyendo en el tamaño del material que conforma el lecho del cauce, en su estabilidad, en la colmatación del medio hiporréico y en sus características hidráulicas (Sedimentation Committee, 1992).

b) Parámetro propuesto P2: **DIFERENCIA ENTRE LA MÁXIMA Y MÍNIMA APORTACIÓN MENSUAL EN EL AÑO**

Dado que la variabilidad interanual queda recogida en la discriminación en “años húmedos, medios y secos”, se propone ahora la caracterización de la variabilidad intranual como diferencia entre la máxima y mínima aportación habida en el año.

La evaluación se realizará año a año para cada uno de los años pertenecientes a un “tipo” determinado. El procedimiento se centra en estimar cual es la diferencia existente en términos de aportación, entre el máximo y mínimo mensual de un año (A en la **Figura nº 6**) calculándose a continuación el promedio para cada uno de los “tipos”. El valor final se obtiene como media ponderada según el porcentaje de presencia de cada tipo en la serie.

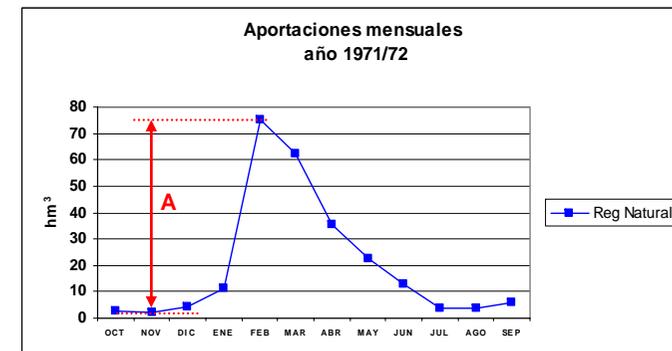


Figura nº 6- Ejemplo de estimación de la variabilidad intranual.

c) Referencias: En las referencias consultadas es habitual el uso del coeficiente de variación como estadístico representativo de la variabilidad interanual trabajando sobre la serie de aportaciones anuales (Brizga *et al.*, 2001; Baeza *et al.*, 2003). Clausen *et al.* (2000) lo aplican sobre la serie de caudales diarios siendo entonces representativo de la variabilidad diaria, y destacando a escala mensual la propuesta de Grown y Marsh (2000). Otros autores introducen

el empleo del sesgo bien en valores anuales o mensuales tal y como aparece recogido en Puckridge *et al.* (1998). Citar por último el empleo de la curva de caudales clasificados (Richards, 1990; Puckridge *et al.*, 1998; Grown y Marsh, 2000;) para la definición de rangos de variación en los caudales diarios.

ESTACIONALIDAD

a) **Significación ambiental:** La estacionalidad de los valores extremos, avenidas y sequías posee ambientalmente más significación que la correspondiente a los valores habituales del régimen de caudales. No obstante, Brizga *et al.* (2001) recogen las consideraciones siguientes:

- La estacionalidad marca el ritmo de los procesos vitales de la biota acuática y riparia, íntimamente ligados y en sincronía con un conjunto de variables ambientales como la temperatura del aire, la temperatura del mar, la fase lunar y las mareas, la duración del día, las tormentas y otros factores climáticos
- La variabilidad estacional es crucial en el mantenimiento de la diversidad temporal de los hábitats
- La estacionalidad del cauce principal posibilita la sincronía con los tributarios y evita procesos de incisión en sus cauces
- La estacionalidad es un estímulo para la germinación y dispersión

b) **Parámetro propuesto P3: MES CORRESPONDIENTE A LA MÁXIMA APORTACIÓN MENSUAL DEL AÑO Y MES CORRESPONDIENTE A LA APORTACIÓN MÍNIMA**

La estacionalidad de las aportaciones mensuales se evaluará para cada tipo de año (húmedo, medio y seco) en una doble caracterización: estacionalidad de los mínimos (o del mes de mínima aportación) y estacionalidad de los máximos (o del mes de máxima aportación). Los meses de mínima y máxima aportación para cada tipo de año se identifican sobre la tabla de aportaciones medianas mensuales que resulta de la caracterización de la variabilidad inter e intranual (ver **Tabla nº 3**)

La **Figura nº 7** muestra un ejemplo de caracterización de la estacionalidad.

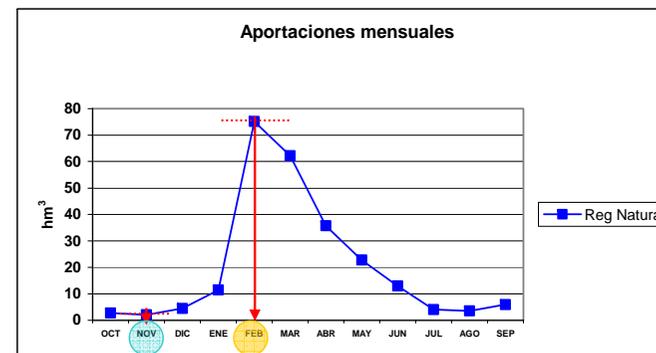


Figura nº 7- Ejemplo de caracterización de la estacionalidad de máximos y de mínimos

c) **Referencias:** En la literatura consultada, la estimación de la estacionalidad de los valores habituales es poco relevante frente a la estacionalidad de los valores extremos, especialmente de los máximos (Richter *et al.*, 1995).

Respecto a valores mensuales, Grown y Marsh (2000) estudian la estacionalidad localizando el mes más seco y el mes más húmedo, entendiendo como tales aquellos meses que poseen más frecuentemente el mínimo (y máximo) caudal medio diario mensual para un registro de 20 años. Otros autores, Brizga *et al.* (2001), realizan clasificaciones en base a distintos percentiles de excedencia de caudales medios diarios para un mes dado y proponen clasificaciones del régimen de caudales según el % de la aportación anual correspondiente a cada mes (Haines *et al.*, 1988).

B.2.1.2.- VALORES DIARIOS O A INTERVALOS MENORES

VARIABILIDAD

a) **Significación ambiental:** la significación ambiental de este aspecto se considera recogida al exponer la significación de la variabilidad de otros valores habituales. (ver epígrafe B.2.1.1)

b) **Parámetro propuesto P4: INTERVALO COMPRENDIDO ENTRE LOS CAUDALES MEDIOS DIARIOS CORRESPONDIENTES A LOS PERCENTILES DE EXCEDENCIA DEL 10% Y 90%, Q₁₀-Q₉₀**

La curva de caudales clasificados o curva de duración de caudales es el instrumento que mejor representa la variabilidad de caudales a lo largo del año, indicando el % de tiempo como media, en el que un valor determinado de caudal es igualado o superado.

Respecto a esta curva se habla del percentil de excedencia del 10% (Q_{10}), como aquel caudal que en promedio sólo es igualado o superado el 10% del año, es decir 36,5 días. Análogamente el percentil de excedencia del 90% (Q_{90}) indicaría aquel caudal que como media es igualado o superado un 90% del año, ó en términos diarios 328,5 días. En esta curva el intervalo Q_{10} - Q_{90} representa el rango de variación de los caudales medios diarios.

Trabajando con la curva media correspondiente a cada tipo de año, la variación *habitual* puede caracterizarse mediante el intervalo Q_{10} - Q_{90} al prescindir de los valores extremos, tanto máximos ($>Q_{10}$) como mínimos ($<Q_{90}$), **Figura n° 8**:

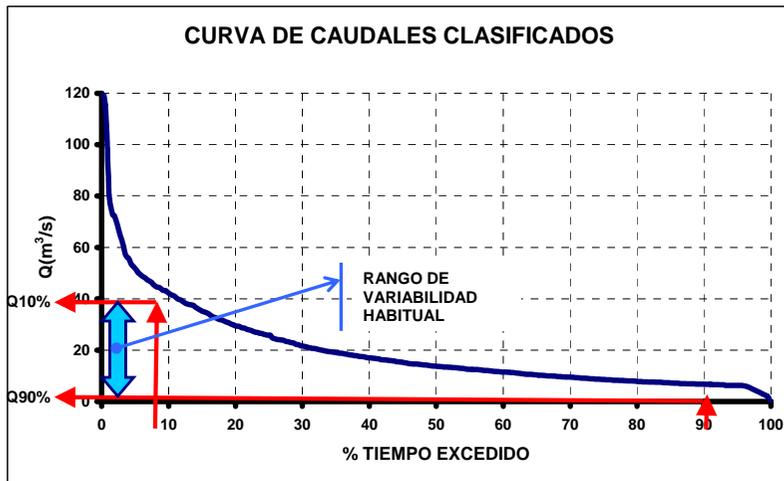


Figura n° 8- Rango de variabilidad "habitual" de los caudales medios diarios Q_{10} - Q_{90} en base a la curva de caudales clasificados

c) **Referencias:** existen múltiples referencias al empleo de la curva de caudales clasificados en la estimación de la variabilidad, siendo los percentiles de excedencia del 10%, 20%, 80% y 90% los empleados más frecuentemente (**Tabla n° 4**).

REFERENCIA	PARÁMETRO	DEFINICIÓN
Baeza <i>et al.</i> (2003)	CV intra	Coficiente de variación intranual. Cociente entre la desviación típica de los 365 caudales diarios del año y la media de caudales de dicho año
Clausen <i>et al.</i> (2000)	SK	Cociente entre la media y la mediana de la serie de caudales medios diarios
	CV	Coficiente de variación de la serie de caudales medios diarios
Growths y Marsh (2000)	PRE y CON	Predictibilidad y constancia calculada a partir del cociente entre el caudal medio diario y la mediana
	Variabilidad mensual	Definida como $(Q_{10}-Q_{90})/mediana$, se calcula para la serie de caudales medios diarios mensuales en una serie de 20 años
Puckridge <i>et al.</i> (1998)	Variabilidad intranual	Rango de caudales comprendido entre los percentiles de excedencia del 20 y 80%
	Variabilidad	En base a caudales medios diarios, se calcula como el cociente entre $Q_{10}-Q_{90}$ y la mediana.
Richards (1990)	Rangos de los caudales diarios	Ratio entre los percentiles de excedencia 10%/90%, 20%/80% y 25%/75% de los caudales diarios para la serie completa.

Tabla n° 4.- Referencias relativas a la estimación de la variabilidad de valores habituales diarios

FLUCTUACIÓN INTRADÍA¹

a) **Significación ambiental:** aunque ya han sido reseñadas las principales implicaciones ambientales de la variabilidad del régimen de caudales (epígrafe B.2.1.1), es cierto que las fluctuaciones diarias cobran especial significación dado que al reflejar la rapidez con la que se producen las variaciones de unas magnitudes a otras afectan directamente a la biota y a su resiliencia (Arthington, 2002). Es fundamental que estas tasas estén en sincronía con la capacidad de respuesta de los organismos, permitiendo el sostenimiento del bentos, la migración de juveniles a hábitats más favorables, el aprovechamiento de nutrientes, etc.

Las principales implicaciones ambientales por alteración en estas fluctuaciones pueden resumirse en:

- GEOMORFOLOGÍA: Alteración en la composición y estabilidad del sustrato (Gonçalves, 2002)
- HÁBITAT HIDRÁULICO: Alteración en la velocidad del agua y otras variables asociadas (Gonçalves, 2002)
- VEGETACIÓN: Afección a los procesos de regeneración vegetal: diseminación, germinación, reproducción vegetativa, etc. (Poff *et al.*, 1997); Daños estructurales y estrés fisiológico (Arthington, 2002)

¹ IAHRIS v1.0 no incorpora el cálculo de este parámetro. Para mayor información puede consultarse la publicación *Índices de Alteración Hidrológica en ecosistemas fluviales* (CEDEX, 2006)



- FAUNA: Incremento de la mortalidad por arrastre en las crecidas o por quedar varados los ejemplares en decrecidas bruscas (Poff *et al.*, 1997); Afcción a la ictiofauna por reducción del hábitat y disminución del alimento (Martínez de Azagra y Sanz, 2003); Pérdida de biomasa en la comunidad béntica por arrastre en las crecidas bruscas o aislamiento en condiciones inadecuadas (Gonçalves, 2002), y reducción considerable en su diversidad (Arthington, 2002); Sustitución de especies autóctonas por otras menos exigentes y más adaptables a estas fluctuaciones (Poff *et al.*, 1997)
- CALIDAD DEL AGUA: Alteración en los parámetros físico-químicos, con especial afcción a la temperatura y concentración de oxígeno disuelto (Gonçalves, 2002)

b) Parámetro propuesto: **FLUCTUACIÓN ABSOLUTA**

Las fluctuaciones del régimen circulante analizadas en pequeños intervalos de tiempo (por ejemplo, horarios) cobran especial relevancia en el caso de tramos sometidos a aprovechamiento hidroeléctrico, donde es fácil que se presente la paradoja de que manteniéndose inalterables los valores medios correspondientes a los caudales diarios, las variaciones de caudal estudiadas bajo un marco temporal más limitado (horario o inferiores) sean sin embargo enormes.

Baker *et al.* (2004) proponen un índice (R-B index, *Richards-Bakers Flashiness Index*) que tomando como intervalo temporal 1 hora es de gran utilidad para caracterizar los pulsos de turbinado diarios de las centrales hidroeléctricas.

Dicho índice responde a la expresión:

$$R-BIndex = \frac{\sum_{i=1}^{24} |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^{24} q_i}$$

donde: q_i = caudal medio en la hora i
 q_{i-1} = caudal medio de la hora $i-1$

Este índice adimensional refleja las oscilaciones de caudal respecto al flujo total diario, constituyendo un buen estimador de las tendencias de crecida y decrecida del caudal circulante.

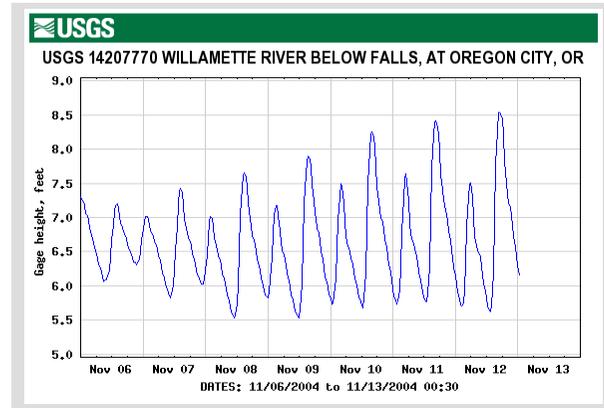


Figura n° 9- Hidrograma aguas abajo de una central hidroeléctrica entre los días 6 y 12 de noviembre. Abajo, detalle para el día 6 de noviembre (Fuente: USGS, 2004)

Si en un supuesto práctico aplicamos el *R-B Index* a los datos recogidos en las Fig. n° 9 y 10 representativos del hidrograma aguas abajo de una central hidroeléctrica y particularizados para un día en concreto (p.e. Nov 06), puede observarse como el numerador de dicho índice representa la suma total de oscilaciones de caudal habidas durante 24 horas:

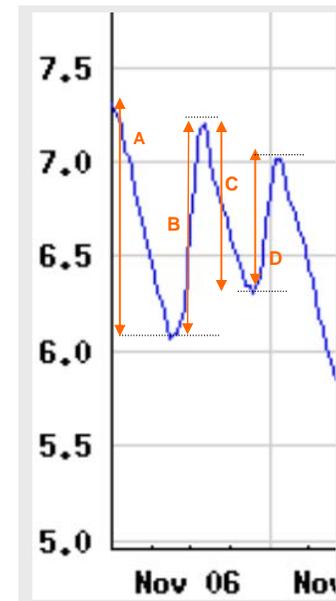


Figura n° 10 Detalle del hidrograma aguas abajo de una central hidroeléctrica para el día 6 de noviembre de 2004. (Fuente: USGS, 2004)

$$\sum_{i=1}^n |q_i - q_{i-1}| = A + B + C + D = Fa$$

confirmando para el ejemplo dado que la suma (A+B+C+D) es representativa de estas oscilaciones. Por tanto, se propone **Fa** como parámetro para caracterizar la fluctuación absoluta.

B.2.2. CARACTERIZACIÓN DE VALORES EXTREMOS MÁXIMOS (AVENIDAS)

En la caracterización del régimen natural de caudales como estructurador del paisaje geomorfológico y biológico del ecosistema fluvial, hay que prestar una especial atención al “cuello de botella” que ecológicamente representan los valores extremos, máximos y mínimos, por constituir las situaciones más críticas, pero también las oportunidades estratégicamente más importantes para la biota (Lytle y Poff, 2004).

El análisis de los valores extremos máximos se realizará en base a dos variables principales. La primera de ellas es el máximo caudal medio diario anual (Qc), obtenido a partir de la serie disponible. En segundo lugar se trabajará con la denominada *avenida habitual*, concepto que será tratado ampliamente en este epígrafe y que viene dado por el valor del caudal correspondiente al percentil de excedencia del 5% en la curva de caudales clasificados en régimen natural (Q_{5%}).

En la **Figura nº 11** se recogen las variables a considerar en los aspectos ecológicamente más significativos de las avenidas:

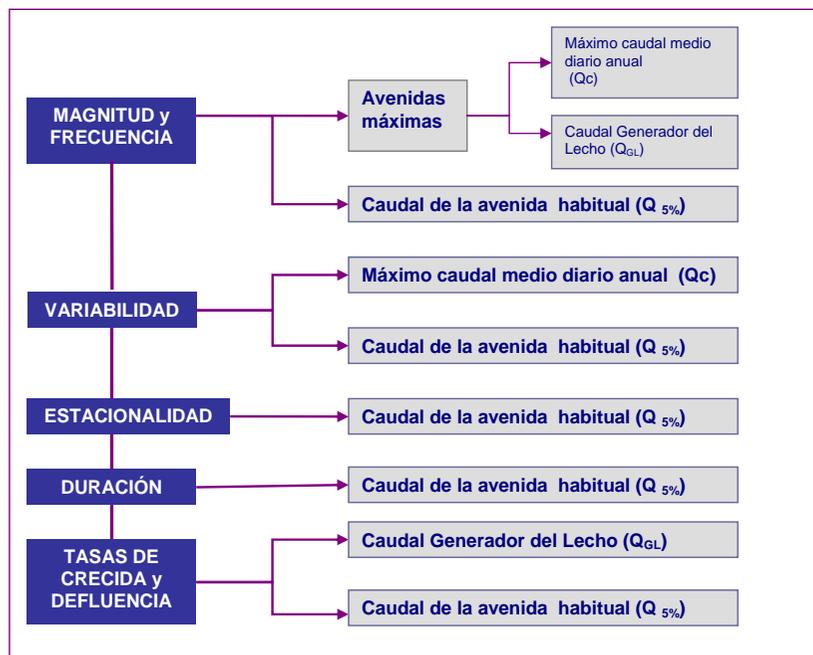


Figura nº 11- Variables empleadas en la caracterización de los valores extremos máximos.

a) Significación ambiental: El papel que juegan las avenidas en la dinámica del ecosistema fluvial es básico para garantizar la integridad del mismo. La significación ambiental de la magnitud de estos caudales máximos esta avalada a nivel científico, manifestándose en los aspectos siguientes:

- **DINÁMICA GEOMORFOLÓGICA**: Mantenimiento de la morfología, geometría del cauce y granulometría del sustrato en equilibrio dinámico (Brizga *et al.*, 2001); Mantenimiento de la secuencia de rápidos y remansos (Bunn y Arthington, 2002); Remoción del sustrato (Poff *et al.*, 1997); Rejuvenecimiento y formación de brazos y pozas laterales (Poff *et al.*, 1997); Formación de barras (Brizga *et al.*, 2001); Transporte y aporte al cauce de grandes restos vegetales que propician la diversidad hidráulica y conforman microhábitats de gran valor ecológico (Poff *et al.*, 1997)
- **CONTINUIDAD TRANSVERSAL**: Restablecimiento de la conectividad cauce-llanura, facilitando el acceso a esta zona y manteniendo unas condiciones de humedad apropiadas (Brizga *et al.*, 2001); Rejuvenecimiento general del hábitat ripario (Richter y Richter, 2000); Estímulo de la sucesión ecológica del bosque ripario (Richter y Richter, 2000); Creación de condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de numerosas especies vegetales y animales especialmente en sus primeros estadios (Poff *et al.*, 1997)
- **CONTINUIDAD VERTICAL**: Conexión con el freático (Pinay *et al.*, 2002); Recarga del acuífero aluvial (Naiman *et al.*, 2000); Mantenimiento de condiciones ambientales adecuadas en el medio hiporréico (Poff *et al.*, 1997)
- **CONTINUIDAD LONGITUDINAL**: Mantenimiento de la función del río como corredor (Bunn y Arthington, 2002); Aporte de sedimentos y nutrientes a lo largo del cauce con especial significación en los tramos de desembocadura, deltas y estuarios (Brizga *et al.*, 2001)
- **ACCIONES RELACIONADAS CON EL CICLO BIOLÓGICO DE LA BIOTA**: Estímulo para los movimientos migratorios de muchas especies (Naiman *et al.*, 2000); Accesibilidad a las zonas de reproducción y alevinaje (Strange *et al.*, 1999); Adaptación de las estrategias reproductivas de muchas especies a estos caudales (Poff y Allan, 1995); Estímulo para la germinación de numerosas especies vegetales (Strange *et al.*, 1999); Regulación de poblaciones, favoreciendo a las especies autóctonas adaptadas frente a las exóticas (Strange *et al.*, 1999); Afecciones al bentos de diversa magnitud y naturaleza (Hickey y Salas, 1995); Un aumento en la magnitud de las



avenidas puede originar daños fisiológicos y mecánicos a la vegetación (Nilsson y Svedmark, 2002); La reducción en magnitud suele favorecer la invasión del cauce por macrófitas (Bunn y Arthington, 2002)

b) **Parámetros propuestos:** La magnitud y frecuencia de las avenidas circulantes se caracteriza mediante cuatro parámetros:

P5: MEDIA DE LOS MÁXIMOS CAUDALES DIARIOS ANUALES

P6: CAUDAL GENERADOR DEL LECHO

P7: CAUDAL DE CONECTIVIDAD

P8: AVENIDA HABITUAL

✚ **P5: MEDIA DE LA SERIE DE MÁXIMOS CAUDALES DIARIOS ANUALES** (\overline{Qc}) como valor representativo de la magnitud media de las crecidas máximas

En la estimación de la magnitud de las avenidas, el valor medio de la serie de máximos caudales medios diarios anuales está referenciado en Richter *et al.* (1997) y Grown y Marsh (2000); otros autores (Clausen y Biggs, 2000; Grown y Marsh, 2000) caracterizan la magnitud de las avenidas a partir de umbrales definidos por "a" veces la mediana con a= 1, 3, 5, 7; Brizga *et al.* (2001), definen avenidas para distintos períodos de retorno (1,5; 3 y 5 años) como magnitudes características del régimen de caudales máximos. Los máximos anuales correspondientes a medias móviles con pasos de 3, 7, 30 y 90 días también aparecen referenciados en Richter *et al.* (1998) en la caracterización de valores máximos.

El valor obtenido con este parámetro es indicativo, también, de la frecuencia de estas avenidas, dada la relación existente entre \overline{Qc} y el período de retorno: recordemos que al valor medio de la serie de caudales medios diarios máximos anuales (\overline{Qc}), le corresponde un período de retorno de 2,33 años, cuando se utiliza la ley de frecuencias Gumbel.

✚ **P6: CAUDAL GENERADOR DEL LECHO** (Q_{GL}), representativo de la magnitud y frecuencia de aquellos caudales máximos con especial significación geomorfológica

Hickey y Salas (1995) recogen una amplia relación de estudios donde se analizan las alteraciones sobre la fauna, vegetación, bentos y geomorfología como consecuencia de modificaciones en el régimen de avenidas.

De todas estas implicaciones ambientales es, sin lugar a dudas, la significación geomorfológica de los caudales máximos, la más tangible, la más fácilmente expresable.

Significación que además está avalada legalmente: la Ley de Aguas (RDL 1/2001, de 20 de julio) define la máxima crecida ordinaria (calculada como el valor medio de los máximos caudales medios diarios anuales de una serie representativa de diez años consecutivos) como el caudal que conforma el cauce y que por tanto es definitorio del Dominio Público Hidráulico.

Ante la indeterminación que conlleva seleccionar una serie representativa de años, el CEDEX (*Aspectos prácticos de definición de la máxima crecida ordinaria* en MIMAM, 2003) propone la expresión siguiente para el cálculo de la Máxima Crecida Ordinaria (Q_{MCO}), caudal que puede aproximarse al denominado Caudal Generador del Lecho y que se obtiene en base a la serie completa disponible de Qc .

$$Q_{MCO} = \overline{Qc} * (0,7 + 0,6 * CV(Qc)) \cong Q_{GL}$$

donde

Q_{MCO} = Caudal correspondiente a la Máxima Crecida Ordinaria

Q_{GL} = Caudal Generador del Lecho

\overline{Qc} = media de la serie de máximos caudales medios diarios anuales

$CV(Qc)$ = coeficiente de variación de la serie de máximos caudales medios diarios anuales

Representando el caudal generador del lecho (Q_{GL}) aquel caudal que a largo plazo realiza un mayor trabajo de movilización y transporte de materiales siendo responsable de la geomorfología del cauce tanto en sección como en planta.

Así, las ecuaciones empíricas clásicas de morfología fluvial (Knighton, 1998) establecen que las variables morfológicas anchura (w), calado medio (h) y perímetro mojado (Pm) pueden expresarse como funciones potenciales de Q_{GL} :

$$w = K_1 * Q_{GL}^b \quad h = K_2 * Q_{GL}^c \quad Pm = K_3 * Q_{GL}^d$$

siendo K_i = constante de proporcionalidad

a, b, c = exponentes

En la literatura especializada (Tabla nº 5) pueden encontrarse numerosos trabajos que permiten estimar estos parámetros, confirmándose en todos ellos que el exponente b toma un valor igual o muy próximo a 0,5, lo cual implica la relación directa entre la anchura del cauce y la raíz cuadrada de Q_{GL} :



VALORES EMPIRICOS DEL EXPONENTE " b" (Fernández Yuste, 2003)				
Sustrato	Fuente	Localización	Características	b
Gravas	Emmett (1975)	Idaho		0,56
	Andrews (1984)	Colorado	Vegetación de orilla densa	0,48
			Vegetación de orilla escasa	0,48
	Hey y Thorne (1986)	Gran Bretaña	Vegetación de orilla herbácea	0,5
			Árboles y arbustos 1-5%	0,5
			Árboles y arbustos 5-50%	0,5
Arenas	Mahmood <i>et al.</i> (1979)	Pakistan	Canales	0,51
	Rundquist (1975)			0,52
Indiferenciado	Castro y Jackson (2001)	Pacific Northwest	Regresión en cauces agrupados en ecoregiones	0,49
		Pacific Maritime		0,50
		West interior		0,60
		Western cordillera		0,44

Tabla n°5.- Referencias empíricas relativas al valor del exponente b en las funciones potenciales de geometría hidráulica (tomada de Fernández Yuste, 2003).

A estas deducciones empíricas del valor de **b** habría que sumar las demostraciones teóricas fundamentadas en procesos físicos de difusión de la cantidad de movimiento como las recogidas en Parker (1979) con $b= 0,5$ y Savenije (2003), que confirma la formula de Lacey para la anchura del cauce ($w= 4,8Q_{GL}^{0,5}$). El trabajo de Savenije (2003) ofrece además una interesante relación de veinticinco estudios experimentales que vuelven a corroborar la constancia del exponente $b =0,5$ en la dependencia de la anchura del cauce respecto al Caudal Generador del Lecho.

Las referencias expuestas anteriormente avalan la significación ambiental del parámetro propuesto, cuyo objetivo es cuantificar la magnitud de aquellos caudales máximos con especial significación geomorfológica.

✚ **P7: CAUDAL DE CONECTIVIDAD** representativo de los caudales máximos que garantizan la conexión cauce-llanura de inundación especialmente ligados con la dinámica de la banda riparia y los ecosistemas dependientes de inundaciones periódicas

El parámetro que se propone, denominado Caudal de Conectividad Q_{CONEC} , trata de evaluar la magnitud de aquellos caudales implicados en el mantenimiento de la conectividad transversal cauce-llanura de inundación; esta conectividad garantiza la accesibilidad a dicha zona y el mantenimiento en ella de unas condiciones de humedad adecuadas para los diferentes estadios de la biota, estimulando además el rejuvenecimiento del hábitat ripario, los procesos de sucesión del bosque de ribera, asegurando el mantenimiento de la secuencia en tramos meandriformes, el rejuvenecimiento de los canales laterales, etc. (Poff *et al.*, 1997; Richter y Richter 2000; Brizga *et al.*, 2001). La conectividad transversal es también crítica en el mantenimiento de la diversidad y funcionalidad de las comunidades de macroinvertebrados (Collier y Scarsbrook, 2000).

Es lógico suponer que para garantizar esta conectividad transversal cauce-llanura de inundación, es necesario un caudal que rebase el cauce y acceda a la llanura, inundándola; por consiguiente Q_{CONEC} debe ser superior al Caudal Generador del Lecho (Q_{GL}) en régimen natural.

Richter y Richter (2000) recogen como umbral de referencia para aquellos caudales que garantizan el mantenimiento del bosque ripario en tramos meandriformes: $Q \cong 125\% Q_{GL}$

Buscando una correlación que nos permita estimar Q_{CONEC} en base a Q_{GL} y dado que por definición $Q_{CONEC} > Q_{GL}$, es obvio que los períodos de retorno también lo serán.

En una primera aproximación se propone estimar Q_{CONEC} como aquel caudal que siendo superior a Q_{GL} , tenga un periodo de retorno doble al de este. Esta suposición nos llevaría a movernos en un intervalo entre 3 y 14 años, dado que el estudio "Aspectos prácticos de la definición de la máxima crecida ordinaria, CEDEX" en MIMAN (2003) fija para el territorio peninsular el intervalo siguiente de períodos de retorno para Q_{GL} :

$$Q (T=1,5 \text{ años}) < Q_{GL} < Q (T= 7 \text{ años})$$

donde los valores bajos corresponden a regímenes de hidrología moderada y los altos a las corrientes de hidrología extrema. Por tanto, para el Caudal de Conectividad, se obtendría

$$Q (T=2 T_{OGL}) < Q_{CONEC} < Q (T= 2T_{OGL}),$$

$$Q (T=3) < Q_{CONEC} < Q (T= 14 \text{ años})$$

Contrastando esta propuesta con valores referenciados en la literatura especializada se puede concluir su aceptación. Así, para ríos de gravas, Schmitd y Potyondy (2004) sitúan el valor del caudal responsable de la inundación parcial de la llanura de inundación (asimilable a nuestro Q_{CONEC}) con sus implicaciones en la dinámica de la vegetación riparia en el intervalo:

$$Q_{GL} < Q_{CONEC} < Q (T= 25 \text{ años})$$



Con respecto a la vegetación Hill *et al.* (1991) estiman que los caudales necesarios para el mantenimiento de la vegetación riparia (caudales que deben inundar esta banda) ocurren con una frecuencia entre 1,5 y 10 años:

$$Q (T=1,5 \text{ años}) < Q_{\text{CONEC}} < Q (T= 10 \text{ años})$$

Trush *et al.* (2000) concluyen que caudales altos, normalmente por encima de períodos de retorno entre 10-20 años son necesarios para el mantenimiento de la complejidad y morfología de la llanura de inundación:

$$Q_{\text{CONEC}} > Q (T= 10 \text{ años} - 20 \text{ años})$$

Schmidt y Potyondy (2004) sitúan el período de recurrencia de 25 años como un valor de carácter conservador en la estimación de los caudales adecuados para una inundación periódica de la llanura:

$$Q_{\text{CONEC}} < Q (T= 25 \text{ años})$$

Como se ha comentado, las referencias expuestas permiten aceptar la estimación del Caudal de Conectividad como aquel caudal correspondiente al doble del periodo de retorno del Caudal Generador del Lecho en régimen natural.

El proceso de obtención del Caudal de Conectividad puede esquematizarse en las fases siguientes:

1. Estimar Q_{GL} en régimen natural y su periodo de retorno correspondiente T_{OGL} (Ley Gumbel)
2. Calcular la magnitud del Caudal de conectividad natural (Q_{CONEC}) como el caudal correspondiente a un período $2 T_{OGL}$.

P8: AVENIDA HABITUAL o caudal correspondiente en la curva media de caudales clasificados al percentil de excedencia del 5% ($Q_{5\%}$), cuya significación ambiental se concreta a diferentes niveles destacando la función de limpieza de materiales finos del sustrato², condicionando la disponibilidad de hábitat para macroinvertebrados, garantizando el biotopo adecuado para la freza de muchas especies, promoviendo la dispersión de propágulos y reorganizando las formas del lecho a pequeña escala.

El término de “avenida habitual” introducido en este trabajo surge de la incertidumbre existente al tratar de materializar el concepto de avenida.

² Schmidt y Potyondy (2004) relacionan esta función de limpieza de finos con avenidas de “pequeña” magnitud, enmarcándolas dentro de los límites definidos por el 0,33 y el 0,5 del Caudal Generador del Lecho. El concepto de avenida “habitual” introducido en este trabajo puede asimilarse al correspondiente a estos caudales de limpieza.

¿Cuándo podemos considerar que un evento determinado es una avenida?

Si trabajamos en términos de caudal, es cierto que el amplio abanico cubierto por estos eventos máximos nos obligaría a hablar de distintos umbrales que deben ser igualados o superados para que la avenida ejerza un trabajo geomorfológico, o asegure la conectividad con la llanura, o revitalice el sustrato, o bien actúe como llamada para la ictiofauna, etc.

En una vía paralela a la anterior, podrían discriminarse las avenidas en términos de tiempo en base a la curva de caudales clasificados, dado que estas curvas nos informan del nº de días al año, como media, en el que un caudal determinado es igualado o superado. De este modo, hablaríamos de avenidas cuando el caudal circulante sea un caudal “alto que se presenta ocasionalmente en el cauce” y podría seleccionarse, dentro de este conjunto de valores máximos, aquel valor que, a modo de umbral, permitiese asignar la condición de avenida a todos aquellos eventos que lo superasen.

Con este objetivo, pueden seleccionarse en la curva de caudales clasificados distintos percentiles de excedencia como umbrales para discriminar una crecida o avenida: el 5% y 16% (Batalla *et al.*, 2004), el 10% y 30% (González del Tánago y García de Jalón, 1995), el 10% y 20% con especial referencia al 5% (Clausen y Biggs, 2000), el 10% (Sugiyama *et al.*, 2003), el 25% (Richter *et al.*, 2004), el 17% como definitorio del umbral de avenidas de limpieza del sustrato (King *et al.*, 1999) y el 5% (Baeza *et al.*, 2003; Baker *et al.*, 2004), son algunos ejemplos que aparecen citados en la literatura especializada como umbrales de caudal por encima de los cuales se asegura la dinámica de la vegetación de ribera, la conectividad con la llanura de inundación, etc.

En esta línea citar que otros autores (Growth y Marsh, 2000) toman como umbrales para caracterizar distintos niveles de avenida, el valor definido por “a” veces la mediana ($a * Q_{50\%}$) con $a = 1, 3, 5, 7$ y 9 .

No obstante, la elección de un percentil determinado como discriminante de qué es una avenida ($Q \geq Q_{\text{percentil}\%}$) y qué no es una avenida ($Q < Q_{\text{percentil}\%}$) no debe realizarse de forma generalizada. Es necesario tener en consideración tanto el número de orden del cauce (definitorio de la magnitud de los eventos) como las pautas de comportamiento hidrológico de la cuenca deducidas de los hidrogramas (caudal base, tiempos al pico, etc.) y de la propia curva de caudales clasificados (cambio perceptible de pendiente).

Ahora bien, dado que esta curva permite conocer el número de días, como media, en que un caudal es igualado o superado, pero no la secuencia temporal de estos días a lo largo del año, es importante que al seleccionar el percentil discriminante se tenga presente de algún modo dicha secuencia.

Esta condición así expuesta, está basada en el hecho constatado de que la permanencia continuada de valores extremos conlleva mayor repercusión ambiental que la ocurrencia aislada

de un caudal máximo. Por ello es preciso conocer para el percentil seleccionado, cual es el **número de días consecutivos** (como media) en que el caudal correspondiente es igualado o superado y **comprobar** que dicha duración es superior a siete días, umbral de permanencia ampliamente referenciado en la literatura especializada como ecológicamente significativo (Bales y Pope, 2001).

En este trabajo se ha seleccionado el percentil del 5% como umbral que define el carácter de avenida. Al caudal correspondiente a este percentil $Q_{5\%}$ se le asigna la denominación de **avenida habitual**, indicando con el calificativo de habitual, que dicho caudal se presenta normalmente todos los años – es igualado o superado como promedio unos 18 días al año-. Según este criterio serían consideradas avenidas cualquier evento con caudales superiores al $Q_{5\%}$ (Figura n° 12)

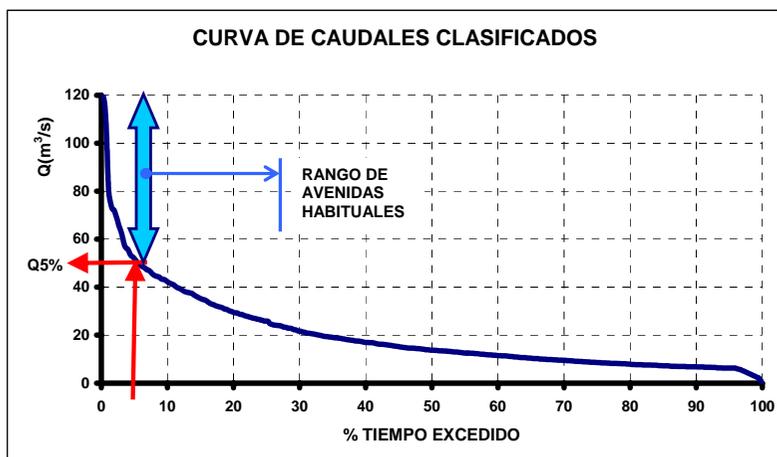


Figura n° 12- Determinación del umbral de avenida “habitual” a partir de la curva de caudales clasificados

Este umbral así definido $Q_{5\%}$ se constituye en una nueva variable hidrológica que al representar fenómenos de recurrencia inferior al año permite una caracterización más precisa de la magnitud de las avenidas, evitando (Maingi y Marsh, 2002) la globalidad inherente a las deducciones obtenidas con series de máximos caudales medios diarios anuales.

Si bien la variable seleccionada lo ha sido para un aspecto de magnitud, al tratarse de un valor vinculado a una probabilidad de excedencia, el 5%, lleva implícita una relación estrecha con la frecuencia (percentil de excedencia = 1- frecuencia relativa acumulada) por lo que el parámetro propuesto para magnitud aporta información también respecto a la frecuencia.

c) **Referencias:** Dada la complejidad inherente a la caracterización de la magnitud de las avenidas, las principales referencias ya han sido expuestas al presentar y justificar otros parámetros ya propuestos.

VARIABILIDAD

a) **Significación ambiental:** La variabilidad interanual juega un papel director en la dinámica geomorfológica y biológica (Brizga *et al.*, 2001). Thoms y Sheldon (2002) constatan las siguientes afecciones derivadas de una pérdida de variabilidad:

- A nivel geomorfológico: alteración de los procesos de erosión y sedimentación, reducción del meandro, pérdida de variabilidad hidráulica en el cauce y en la llanura de inundación.
- A nivel biológico: influencia en múltiples procesos del ecosistema como transporte de organismos, nutrientes, carbono orgánico y otros materiales, promoviendo la diversidad física y química, tanto espacial como temporalmente.

Poff *et al.* (1997) recogen como la pérdida de variabilidad promueve también la competencia excluyente de unas especies de peces a expensas de las nativas, que en general resultan perjudicadas. Richter *et al.* (1998) constatan la afección a las especies riparias y a la dinámica de sus comunidades, la muerte por desecación, la reducción del crecimiento, la competencia excluyente, la germinación fallida y la salinización del terreno.

Es por tanto de gran trascendencia para la biota que los valores máximos fluctúen dentro de unos rangos compatibles con sus requerimientos, y que estas fluctuaciones sean además predecibles, garantizando la armonía con los ciclos de vida de las especies.

b) **Parámetros propuestos:**

- ✚ **P9: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA SERIE DE MÁXIMOS CAUDALES DIARIOS ANUALES $CV(Q_c)$**
- ✚ **P10: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA SERIE DE CAUDALES CORRESPONDIENTES A LA AVENIDA HABITUAL $CV(Q_{5\%})$**

c) **Referencias:** Grown y Marsh (2000) recogen el coeficiente de variación del n° de flujos al año que superan el umbral definido por “a” veces la mediana, con a= 1,3,5,7 y 9 y el coeficiente de variación de la serie de valores correspondientes al caudal punta de aquellos eventos que



superan el umbral definido por "a" veces la mediana, así como la desviación típica y el coeficiente de variación de la serie de máximos caudales diarios anuales.

DURACIÓN

a) **Significación ambiental:** Las alteraciones ambientales derivadas de distorsiones en la duración de las avenidas están fuertemente ligadas a otros aspectos tales como su magnitud y frecuencia, y muchos de los comentarios sobre la significación ambiental de los índices de magnitud y variabilidad pueden igualmente realizarse ahora. Se reseñan también los efectos siguientes:

- GEOMORFOLOGÍA: pérdida de los rápidos como hábitats de calidad si se prolongan los caudales altos (Poff *et al.*, 1997); Cambios geomorfológicos como corte de meandros y migraciones laterales (Richter y Richter, 2000)
- VEGETACIÓN: incremento en la tasa de mortalidad de las especies vegetales más sensibles si aumenta el período de inundación (stress por anoxia, Kozlowski, 1984), o si se prolonga el período de "no inundación" (Brizga *et al.*, 2001); Afección a los procesos de sucesión vegetal, alterándose la distribución y composición de las distintas agrupaciones (Poff *et al.*, 1997)
- FAUNA: Pérdida en las condiciones del hábitat fluvial si se altera la duración de los caudales máximos (Martínez de Azagra y Sanz, 2003); Afección al hábitat de macroinvertebrados, arrastre y mortalidad (Gonçalves, 2002)

b) **Parámetro propuesto P11: MÁXIMO NÚMERO DE DÍAS CONSECUTIVOS AL AÑO CON CAUDAL MEDIO DIARIO SUPERIOR AL Q_{5%}**

Habiendo definido las avenidas como aquellos eventos que superan el umbral correspondiente al Q_{5%} de la serie natural, la etapa siguiente es caracterizar la duración de estos eventos, lo que conlleva el planteamiento de la siguiente secuencia de cuestiones:

*¿cuánto dura una avenida? ¿cuándo empieza? ¿cuándo termina?
Y sobre todo, ¿cómo homogeneizar estos criterios teniendo en cuenta la variabilidad intrínseca en magnitud y duración de estos fenómenos?*

El empleo de medias móviles es un procedimiento habitualmente utilizado en la estimación de la continuidad temporal de un flujo (Richter *et al.*, 1997; Growsn y Marsh, 2000; Bales y Pope, 2001). Clausen y Biggs (2000) y Growsn y Marsh (2000) caracterizan la duración de las avenidas estimando la duración media de aquellos flujos que superan el umbral definido por "a" veces la mediana.

En este trabajo se propone estimar para cada año de la serie cual es el máximo número de días consecutivos en que se iguala o supera el umbral del Q_{5%}. El parámetro final se calcula como el valor medio de la serie de n años. El parámetro así definido es obvio que no representa la duración de las avenidas como eventos individuales (*tiempo de crecida + tiempo de defluencia*), pero sí deja constancia de la permanencia continuada en el cauce de caudales superiores al que define una avenida habitual.

c) **Referencias:**

REFERENCIA	PARÁMETRO	DEFINICIÓN
Clausen y Biggs (2000) Growsn y Marsh (2000)	a * Q50 con "a"= 1,3, 5, 7 y 9	Duración media de los flujos que superan el umbral definido por "a" veces la mediana
Clausen y Biggs (2000)	a * Q50 con "a"= 1,3, 5, 7 y 9	Nº total de días en el año, como media, en que se supera el umbral de "a" veces la mediana
Baeza <i>et al.</i> (2003)	NQ 36	Nº de días al año en que el caudal supera el valor correspondiente al percentil del 10%
Growsn y Marsh (2000)	Q30d y Q90d	Mediana y media de los máximos anuales para medias móviles con paso de 30 y 90 días
Bales y Pope (2001)	Q7d y Q30d	Media de los máximos anuales para medias móviles con paso de 7 y 30 días
Richter <i>et al.</i> (1997)	Q _{25%}	Nº medio y duración media de flujos que igualan o superan el percentil del 25% en la curva de caudales clasificados
	Q3d, Q7d, Q30d y Q90d	Media de los máximos anuales para medias móviles con paso de 3, 7, 30 y 90 días

Tabla n° 6.- Referencias relativas a la estimación de la duración de valores extremos máximos

ESTACIONALIDAD

a) **Significación ambiental:** no respetar las pautas estacionales naturales de las avenidas puede producir fuertes distorsiones en el funcionamiento del río como ecosistema, básicamente motivadas por la pérdida de sincronía con los ciclos vitales de las especies afectadas, además de múltiples efectos autoacumulables con otras variables ambientales.

Como resumen pueden citarse las alteraciones siguientes:

- Pérdida de sincronía con la fenología de muchas especies animales, afectando a las pautas reproductivas, migración, freza, incubación, supervivencia de las larvas, crecimiento y desarrollo (Naiman *et al.*, 2000)
- Aislamiento de organismos por pérdida de conectividad hidráulica (Bunn y Arthington, 2002)
- Alteración en la producción en biomasa animal y vegetal (Poff y Allan, 1995)

- Pérdida de sincronía con la fenología de muchas especies vegetales, afectando a los procesos de dispersión, germinación, etc. (Poff *et al.*, 1997; Richter *et al.*, 1998)
- Progresión de especies vegetales foráneas con requerimientos de germinación menos específicos, con la consecuente pérdida de diversidad y afección a la productividad del bosque ripario (Richter y Richter, 2000; Brizga *et al.*, 2001)
- Afección a la calidad del agua por pérdida de sincronía con el régimen natural de precipitaciones, régimen térmico, horas de luz, etc. (Brizga *et al.*, 2001)
- Cambios geomorfológicos en confluencias por la pérdida de sincronía con los tributarios (Brizga *et al.*, 2001)
- Variación en la concentración de sólidos en suspensión (Sedimentation Committee, 1992)
- Ocupación del cauce por macrófitas (Bunn y Arthington, 2002)
- Alteración en el ciclo de la materia orgánica y otros nutrientes (Dieterle *et al.*, 2003)

b) **Parámetro propuesto P12: NÚMERO MEDIO DE DÍAS AL MES CON CAUDAL MEDIO DIARIO SUPERIOR AL $Q_{5\%}$**

El parámetro aquí propuesto caracteriza la estacionalidad evaluando la presencia o ausencia de avenidas en un mes determinado. El caudal que se toma como referencia para caracterizar esta presencia o ausencia es el valor correspondiente al umbral que define la avenida habitual ($Q_{5\%}$) en régimen natural.

El conteo se realiza para cada mes y año de la serie, obteniéndose al final doce valores representativos del número medio de días al mes que presentan un caudal medio diario superior al que define la avenida habitual.

- b) **Referencias:** Richter *et al.* (1997) y Baeza *et al.* (2003) evalúan la estacionalidad en base al día del año en que se produce el caudal máximo diario anual. Grows y Marsh (2000) determinan la estación que alberga el mayor número de flujos mayores que tres y nueve veces la mediana así como el número de eventos de estas características correspondientes a cada estación.

TASAS DE CRECIDA Y DEFLUENCIA³

a) **Significación ambiental:** las tasas de crecida y defluencia de las avenidas están referidas a la rapidez con la que se producen las variaciones de unas magnitudes a otras en el transcurso de una avenida

Las implicaciones ambientales de estas tasas, cuya significación es crucial para la biota, han sido ya expuestas al caracterizar la fluctuación diaria (epígrafe B.2.1.2).

b) **Parámetros propuestos: MÁXIMAS TASAS RELATIVAS EN CRECIDA Y DEFLUENCIA**

La caracterización de las tasas máximas relativas de crecida y defluencia que se presentan en este epígrafe, pueden ser consideradas como pautas de comportamiento límite en la implementación de avenidas con fines eco-geomorfológicos cuando el régimen circulante no respeta las crecidas naturales (por ejemplo en embalses donde la capacidad del vaso sea muy superior a la aportación de la cuenca, o donde las normas de explotación propicien la laminación de avenidas).

En este proceso de caracterización se trabajará con la serie de registros de caudales medios diarios disponible en régimen natural, y pueden diferenciarse las etapas siguientes:

1.- Seleccionar de la serie de caudales medios diarios disponible aquellos máximos ($Q_{m\acute{a}x}$) cuyo valor sea superior al de la avenida definida como habitual ($Q_{m\acute{a}x} > Q_{5\%}$).

2.- Para las avenidas seleccionadas en 1.-, caracterizar su hidrograma con los datos correspondientes a los "a" días anteriores y los "b" días posteriores al día correspondiente al $Q_{m\acute{a}x}$.

Los valores de "a" y "b" deberán adoptarse para cada caso concreto, de manera que cubran adecuadamente los tramos de crecida y defluencia de los hidrogramas observados en régimen natural correspondientes a avenidas con $Q_{m\acute{a}x} > Q_{5\%}$

3.- Clasificar las hidrogramas obtenidos en dos grupos:

- **Grupo I:** constituido por avenidas definidas como "ordinarias", pues siendo superiores a la habitual ($Q_{5\%}$), su $Q_{m\acute{a}x}$ no supera el valor del Caudal Generador del Lecho (Q_{GL}).

$$Q_{5\%} < Q_{m\acute{a}x} < Q_{GL}$$

³ IAHRIS v1.0 no incorpora el cálculo de este parámetro



- **Grupo II:** constituido por avenidas "extraordinarias" con caudales máximos siempre superiores al Caudal Generator del Lecho

$$Q_{m\acute{a}x} > Q_{GL}$$

4.-A continuación, para cada uno de los grupos anteriores, se procede a adimensionalizar los hidrogramas (dividiendo los valores de las ordenadas por el $Q_{m\acute{a}x}$ correspondiente). Esta operación permite la representación conjunta (Figura n° 13) de los hidrogramas de cada grupo, y la selección *de visu* de los tramos correspondientes a las tasas de crecida y defluencia máximas relativas para cada uno de los (a+b+1) días representados.

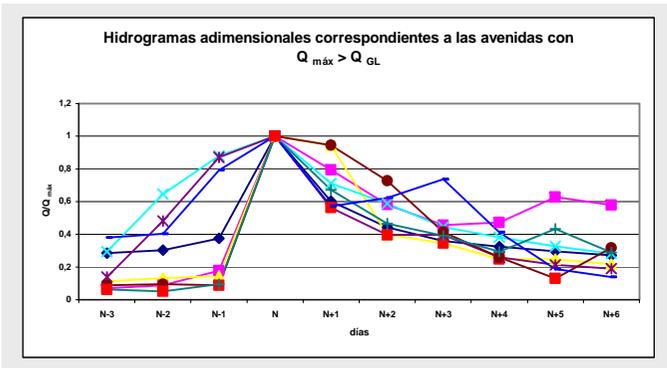


Figura n°13- Hidrogramas adimensionales de las avenidas con $Q_{m\acute{a}x} > Q_{GL}$, mostrando la selección de los puntos correspondientes a las máximas tasas relativas de crecida y defluencia ■

5.- En base a la selección hecha en el punto anterior, conformar un hidrograma patrón (Figura n° 14) que sea representativo de las máximas tasas relativas observadas

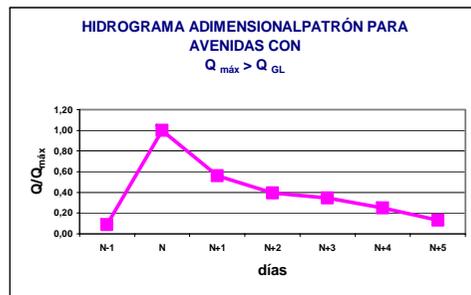


Figura n° 14- Hidrograma adimensional representativo de las máximas tasas diarias relativas en crecida y defluencia para avenidas con $Q_{m\acute{a}x} > Q_{GL}$.

6.- Estos valores pueden ser utilizados como referencia de las **máximas tasas relativas** observadas en régimen natural, sirviendo de pauta para establecer en las normas de operación de los órganos de desagüe de la presa unos umbrales máximos acorde con los observados en régimen natural.

c) Referencias:

En la bibliografía consultada se recogen diversos parámetros que intentan caracterizar el proceso de crecida y defluencia de una avenida. Grown y Marsh (2000) y Maingi y Marsh (2001) emplean el número de crecidas y defluencias al año (media, mediana, desviación típica y coeficiente de variación) y la duración de cada avenida (media, mediana, desviación típica y coeficiente de variación) además de otros parámetros relativos a las tasas diarias de incremento y detrimento.

B.2.3 CARACTERIZACIÓN DE VALORES EXTREMOS MÍNIMOS (SEQUÍAS)

Siguiendo un procedimiento similar al utilizado en la caracterización de las avenidas, al analizar las sequías se prescindirá de la segregación en años húmedos, medios y secos, trabajando con la serie disponible de mínimos caudales medios diarios anuales (Q_s). Y con un razonamiento similar al expuesto para la definición de la avenida habitual ($Q_{5\%}$), en la caracterización de las sequías se introduce el concepto de **sequía habitual**, que será expuesto más detalladamente en epígrafes posteriores, y se define como aquel caudal correspondiente al percentil de excedencia del 95% en la curva de duración de caudales en régimen natural $Q_{95\%}$.

La **Figura n° 15** recoge el conjunto de las variables empleadas en la caracterización de las sequías:

El valor medio de la serie de mínimos caudales diarios anuales es un buen instrumento para caracterizar sequías extremas, pero se hace necesario encontrar otro parámetro que, siendo representativo de caudales bajos, no focalice su definición en situaciones límite, sino que sea representativo de los períodos de caudales bajos más habituales.

Por esta razón y al igual que se hizo al caracterizar las avenidas habituales, la curva de caudales clasificados se constituye en un instrumento altamente útil, pues a partir de percentiles de excedencia altos (80%, 90% ó 95%) pueden discriminarse distintos umbrales de caudal que permiten establecer criterios conjuntos de magnitud y presencia; es decir caudales inferiores a estos umbrales ($Q_{80\%}$, $Q_{90\%}$ ó $Q_{95\%}$) se presentarán, en término medio, 54, 36 ó 18 días al año respectivamente.

Como umbrales en la curva de caudales clasificados para la caracterización de sequías, encontramos referencias diversas: Grown y Marsh (2000) trabajan con el umbral definido por "a" veces la mediana ($Q_{50\%}$), con $a = 1/2, 1/3, 1/9$; diversos autores (Clausen y Biggs, 2000; Bales y Pope, 2001), seleccionan el percentil del 90% como definitorio de umbral para caudales bajos; Dakova *et al.* (2000) trabajan con el percentil del 95% de las medias mensuales, valor definitorio del mínimo caudal mensual en la legislación búlgara; Maingi y Marsh (2002) fijan el límite en el percentil de excedencia del 75%; King *et al.* (1999) citan el 80% como umbral que asegura un hábitat mínimo para adultos, producción de macroinvertebrados y mantenimiento de la cubierta vegetal.

No obstante, al igual que se formuló para avenidas, es necesario paliar la falta de información inherente a la curva de caudales clasificados respecto a la distribución temporal de los períodos con caudales inferiores al elegido. Por ello, se propone determinar para el percentil seleccionado cual es el **número de días consecutivos**, como media, en que el caudal toma valores inferiores al correspondiente a dicho percentil y comprobar que esta permanencia en el cauce es superior a siete días, valor referenciado en la literatura especializada como período mínimo con significación ecológica (Bales y Pope, 2001).

Por analogía al 5% elegido para avenidas, se ha seleccionado el percentil de excedencia del 95%, $Q_{95\%}$, como umbral por debajo del cual podemos concluir que estamos ante una **sequía habitual**, correspondiendo a este percentil una presencia media al año de 18 días (Figura n° 16).

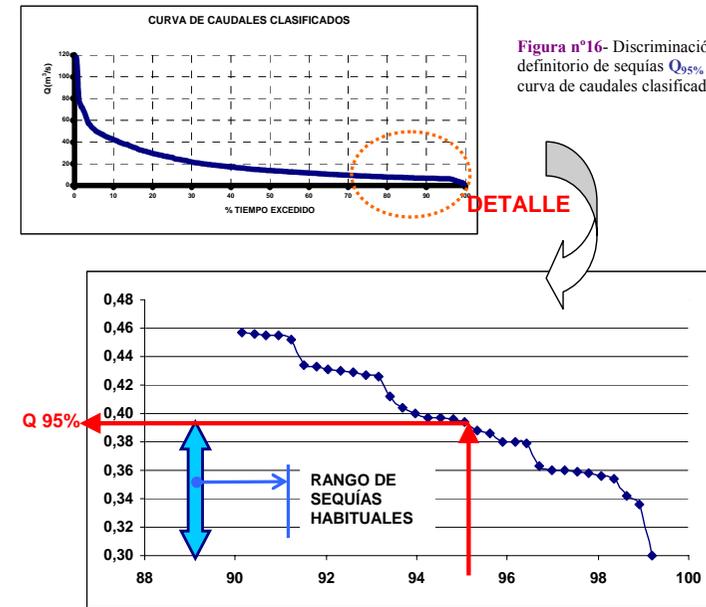


Figura n°16- Discriminación del umbral definitorio de sequías $Q_{95\%}$ a partir de la curva de caudales clasificados

Si bien la variable seleccionada lo ha sido sólo para un parámetro de magnitud, al tratarse de un valor vinculado a una probabilidad de excedencia ($Q_{95\%}$) lleva implícito una estrecha vinculación con la frecuencia (percentil de excedencia = 1- frecuencia relativa acumulada) por lo que el parámetro propuesto para magnitud aporta también información respecto a frecuencia.



c) Referencias:

REFERENCIA	PARÁMETRO	DEFINICIÓN
Clausen y Biggs (2000)	Q90/Q50	Cociente entre el valor del caudal que es igualado o excedido un 90% del tiempo y el valor correspondiente al 50%
	$\overline{Q_s} / Q_{50}$	Media de los caudales medios diarios mínimos anuales entre el caudal correspondiente al percentil del 50%
	Índice del caudal base	Volumen correspondiente al caudal base entre el volumen correspondiente al flujo total
Brizga <i>et al.</i> (2001)	% de excedencia diaria para 10 y 30 cm.	Porcentaje de días respecto al total del período en que el caudal medio diario supone un calado ≥ 10 cm. en secciones críticas (rápidos). Análoga definición para 30 cm.
	Q80 y Q90	Caudales correspondientes a los percentiles de excedencia del 80% y 90% respectivamente.
Growth y Marsh (2000)	aQ50 con a = 1/2, 1/3, 1/9	Nº de eventos que no superan el umbral definido por "a" veces la mediana Magnitud de aquellos eventos que no superan el umbral definido por "a" veces la mediana
	10% Q medio diario anual*	Nº de eventos que no superan el umbral definido por el 10% del Q medio diario Magnitud de los eventos que no superan el umbral definido por el 10% del Q medio diario
	$\overline{(Q_s)}$	Media y mediana de la serie de mínimos caudales medios diarios anuales
Richter <i>et al.</i> , (1995)	$\overline{(Q_s)}$ y Q3d, Q7d, Q30d y Q90d	Media de los caudales mínimos diarios anuales y de los correspondientes a pasos de 3, 7, 30 y 90 días.
Bales y Pope (2001)	7Q10	Mínimo valor de siete días consecutivos que como promedio ocurre una vez cada diez años.
Sugiyama <i>et al.</i> , (2003)	Q97 ₁₀	Caudal correspondiente al percentil de excedencia del 97% para una serie de 10 años.

*el método Tennant reconoce el 10% del caudal medio diario anual como el mínimo flujo recomendado para mantener a corto plazo el hábitat imprescindible para la mayor parte de la biota acuática (King *et al.*, 1999)

Tabla n° 7.- Referencias relativas a la estimación de la magnitud de valores extremos mínimos

VARIABILIDAD

a) Significación ambiental: es de gran trascendencia para la biota que los valores mínimos circulantes, al igual que los máximos, fluctúen dentro de unos rangos compatibles con sus requerimientos y que estas fluctuaciones sean además predecibles por los organismos afectados, pues es la predictibilidad de ciertos eventos, especialmente de los valores extremos, la salvaguarda que permite la adaptación a ellos de los ciclos de vida de las especies (González del Tánago y García de Jalón, 1995). Esta variabilidad juega un papel director en la dinámica del ecosistema fluvial (Brizga *et al.*, 2001), de modo que se constata que una pérdida de la misma puede originar:

- Afeciones diversas al bentos, favoreciendo a unas especies en detrimento de otras (Jowet, 2000)
- Afeción a la dinámica vegetal, intromisión en la sucesión y en la competencia no excluyente (Poff *et al.*, 1997)
- Pérdida de diversidad en la ictiofauna (Richter *et al.*, 1998)

b) Parámetros propuestos:

- ✚ **P15: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA SERIE DE MÍNIMOS CAUDALES DIARIOS ANUALES CV (Qs)**
- ✚ **P16: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA SERIE DE CAUDALES CORRESPONDIENTES A LA SEQUÍA HABITUAL, CV (Q_{95%})**

c) Referencias: Richter *et al.* (1997) emplea el coeficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales

DURACIÓN

a) Significación ambiental: las alteraciones ambientales derivadas de distorsiones en la duración de las sequías están fuertemente ligadas a otros aspectos tales como su magnitud y frecuencia y muchos de los comentarios sobre la significación ambiental de los índices de magnitud y variabilidad pueden igualmente realizarse ahora. Lytle y Poff (2004) presentan una relación exhaustiva de adaptaciones en el ciclo de vida, en el comportamiento y en las adaptaciones morfológicas de especies animales y vegetales a los eventos extremos de avenidas y sequías. Dicho trabajo concluye que el modo en que los organismos se han adaptado a estos eventos es el factor determinante de su vulnerabilidad frente a diferentes alteraciones en el régimen de caudales, quedando como interrogante abierto cual es la facilidad de adaptación como respuesta a estas alteraciones.

Se reseñan también los efectos siguientes:

- EN LA BIOTA ACUÁTICA Y RIPARIA: Afeción si se altera la tolerancia de las comunidades de macroinvertebrados y peces a la duración de la sequía (Poff *et al.*, 1997); Influencia en el tamaño, tolerancia y comportamiento trófico de la ictiofauna presente, observando ejemplares más pequeños, y predominio de especies más generalistas si persisten los períodos de aguas bajas (Bunn y Arthington, 2002); Pérdida de sincronía con la temperatura y la duración del día, pudiendo impactar en las pautas reproductivas y de crecimiento de las



especies (Poff *et al.*, 1997); Pérdida en las condiciones del hábitat fluvial si se altera la duración de los períodos secos (Martínez de Azagra y Sanz, 2003)

- EN EL CICLO DE NUTRIENTES: Afeción al ciclo del nitrógeno, debido a que la duración de los caudales bajos posibilita la secuencia de condiciones aerobias-anaerobias necesaria para completar dicho ciclo (Pinay *et al.*, 2002); Afeción a la mineralización de muchos compuestos orgánicos, afectando a la fertilidad del suelo (Pinay *et al.*, 2002).

Estos comentarios referentes a la significación ambiental de la duración de los períodos secos, pueden ser matizados más intensamente cuando nos referimos a períodos de caudal nulo. La ausencia de caudal es un aspecto de gran trascendencia biológica dentro del régimen hidrológico (Growth y Marsh, 2000), pues determina las condiciones de vida más críticas para la biocenosis y la posible alteración de la estructura del ecosistema si se supera su capacidad de resiliencia.

b) Parámetros propuestos:

P 17: MÁXIMO NÚMERO DE DÍAS CONSECUTIVOS CON CAUDAL INFERIOR AL

$Q_{95\%}$

P18: NÚMERO MEDIO DE DÍAS AL MES CON CAUDAL DIARIO NULO

P17: MÁXIMO NÚMERO DE DÍAS CONSECUTIVOS CON CAUDAL INFERIOR AL

$Q_{95\%}$

Puede plantearse un razonamiento semejante al expuesto respecto a la caracterización de la duración de las avenidas:

¿cuánto dura una sequía? ¿cuándo empieza? ¿cuándo termina?

Y sobre todo, ¿cómo homogeneizar estos criterios teniendo en cuenta la variabilidad intrínseca en magnitud y duración de estos fenómenos?

El procedimiento más habitual para caracterizar la duración de los períodos secos es determinar el número de días o de períodos de días consecutivos en que no se supera un umbral determinado (Richter *et al.*, 1997; Growth y Marsh, 2000; Brizga *et al.*, 2001; Baeza *et al.*, 2003), definiéndose el umbral mediante variables hidráulicas como un calado mínimo, o a partir de un caudal definido por "a" veces la mediana, o a partir de la curva de caudales clasificados. Otros autores se basan en procesos de medias móviles (Richter *et al.*, 1997; Palau 1998; Growth y Marsh, 2000; Bales y Pope, 2001).

En este trabajo se propone estimar para cada año de la serie cual es el máximo número de días consecutivos en que no se iguala o supera el umbral del $Q_{95\%}$. El parámetro final se calcula como la media para la serie de n años. En definitiva se trata de caracterizar el valor medio del máximo número de días secos consecutivos al año, entendiendo por día seco aquel cuyo caudal es inferior al $Q_{95\%}$. Este parámetro así calculado, permite estimar la máxima permanencia continuada en el cauce de caudales inferiores al correspondiente a un día seco. Es obvio que en el caso de sequías muy prolongadas pero que presenten una fase intermedia de recuperación (días con caudal medio diario $> Q_{95\%}$), el índice propuesto fragmentaría la duración total del período seco, estimándose exclusivamente el período parcial de mayor duración.

P18: NÚMERO MEDIO DE DÍAS AL MES CON CAUDAL DIARIO NULO

El estudio de los períodos de caudal nulo, dada su trascendencia ambiental, aparece bien referenciado en la literatura especializada (Richter *et al.*, 1997; Growth y Marsh, 2000) estimando el número total de días con caudal nulo en la serie, o la media anual, o el porcentaje de meses con algún día de caudal nulo. El parámetro aquí propuesto se obtiene como el valor medio del número de días al mes que presentan un caudal diario igual a cero.

c) Referencias:

REFERENCIA	PARÁMETRO	DEFINICIÓN
Brizga <i>et al.</i> (2001)	Nº de períodos secos	Nº de períodos de días consecutivos en los cuales no se superó un calado de 10 cm. y con duración igual o superior a 1, 3, 6 y 9 meses.
	Duración de flujos < 1ML/día	Porcentaje de días respecto al total del período en que el caudal medio diario es inferior a 1 ML/día
	Número de períodos < umbral	Nº de períodos de días consecutivos con caudal medio diario < umbral y con duración igual o superior a 1, 3, 6 y 9 meses.
Baeza <i>et al.</i> (2003)	NQ10%	Número de días en que no se alcanza un caudal mínimo representando por el 10% del caudal modular
	Q7d, Q25d y Q100d	Valor medio de los mínimos de cada año de la serie de medias móviles con pasos de 7, 25 y 100 días
Growth y Marsh (2000)	a*Q50 con a = 1/2, 1/3, 1/9	Duración de los eventos que no superan el umbral definido por "a" veces la mediana
	10% Q medio diario	Duración de los eventos que no superan el umbral definido por el 10% del Q medio diario anual
	Q30d y Q90d	Mediana y media de los mínimos anuales para medias móviles con paso de 30 y 90 días
Bales y Pope (2001)	Q7d y Q30d	Media de los mínimos anuales para medias móviles con paso de 7 y 30 días
Richter <i>et al.</i> (1997)	Q75 %	Nº medio y duración media de flujos que no superan el percentil del 75% en la curva de caudales clasificados

Tabla n° 8.- Referencias relativas a la estimación de la duración de valores extremos mínimos



REFERENCIA	PARÁMETRO	DEFINICIÓN
Gronics y Marsh (2000)	Días con Q = 0	Número total de días con Q = 0 en los registros de la serie
		Número medio de días por año con Q = 0
		Porcentaje de meses que tienen algún día con Q = 0
Richter <i>et al</i> (1997)	Días con Q = 0	Número total de días con Q = 0 en los registros de la serie
	Caudal base	Cociente entre el caudal mínimo para 7 días consecutivos y el caudal medio anual.

Tabla n° 9.- Referencias relativas a la estimación de la duración de periodos de caudal nulo

ESTACIONALIDAD

a) Significación ambiental: la estacionalidad de las sequías de no respetar las pautas naturales puede producir fuertes distorsiones en el funcionamiento del río como ecosistema. La razón de ello es la pérdida de sincronía con los ciclos vitales de las especies afectadas, además de múltiples efectos autoacumulables sobre otras variables ambientales. Como ejemplo de afecciones sobre la biota acuática y riparia se recogen las referencias siguientes:

- Estrés fisiológico en muchas especies si se prolongan los periodos secos (Poff *et al.*, 1997)
- Un incremento de los caudales circulantes en verano, puede alterar la dinámica vegetal, favoreciendo a las especies más generalistas (Strange *et al.*, 1999)
- Afección diversa, dependiendo de su sensibilidad a los cambios según diferentes aspectos: época de freza, período de desarrollo larvario, huevos flotantes, reducción del hábitat, etc. (Strange *et al.*, 1999; Poff *et al.*, 1997)
- Pérdida de sincronía con la temperatura y la duración del día, que puede afectar a la reproducción y crecimiento de las especies (Poff *et al.*, 1997)
- Pérdida de sincronía en la respuesta de los organismos a la recesión de caudales según pautas que permitan el aprovechamiento de nutrientes, desarrollo de semillas, sostenimiento del bentos y migración de juveniles a hábitats más favorables (Arthington 2002)
- Pérdida de sincronía con la fenología de muchas especies animales, afectando a las pautas reproductivas, migración, freza, incubación, supervivencia de las larvas, crecimiento y desarrollo (Naiman *et al.*, 2000)
- La pérdida de la estacionalidad favorece a las especies exóticas, originando una pérdida de biodiversidad (Bunn y Arthington, 2002).
- Alteración en el estado de diapausa sincronizado con los periodos secos (Lytle y Poff, 2004)

b) Parámetro propuesto P19: NÚMERO MEDIO DE DÍAS AL MES CON CAUDAL INFERIOR AL Q_{95%}

La estacionalidad o temporalidad de las sequías es caracterizada en las fuentes consultadas con varios enfoques: Richter *et al.* (1997) utiliza como parámetro el día del año en que se presenta el mínimo anual y Gronics y Marsh (2003) determinan la estación del año que alberga el mayor número de flujos inferiores a un tercio de la mediana.

El parámetro propuesto en este trabajo caracteriza la estacionalidad evaluando la presencia o ausencia de **días secos** en un mes determinado, es decir aquellos días con caudal medio diario inferior al que define la sequía habitual en régimen natural (Q_{95%}).

El conteo se realiza para cada mes y año de la serie, obteniéndose al final doce valores representativos del número medio de días al mes que presentan una caudal medio diario inferior al Q_{95%}.

C CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN ALTERADO DE CAUDALES

C.1 CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN ALTERADO EN SITUACIÓN DE COETANEIDAD

La situación de coetaneidad exige que la serie de datos disponibles en el régimen alterado sea coincidente al menos en 15 años con la serie disponible en régimen natural.

Cuando esta condición se cumple cada año hidrológico lleva asignado un tipo (húmedo, medio o seco), en función de su aportación en régimen natural (ver epígrafe B.2.1.). Ello permite por tanto caracterizar el régimen alterado con idénticos parámetros a los empleados en régimen natural. La relación de estos parámetros puede encontrarse en la **Tabla n° 2**. Una descripción detallada de los mismos aparece en los epígrafes B.2.1, B.2.2. y B.2.3.

C.2 CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN ALTERADO EN SITUACIÓN DE NO COETANEIDAD

En el caso particular de desear caracterizar un régimen alterado sin disponer de una serie coetánea con la existente en régimen natural (al menos 15 años comunes), es necesario redefinir los parámetros para valores habituales que caracterizan el régimen alterado. Ello es debido a que los años en alterado no comunes con años en régimen natural no pueden ser adscritos a ninguno de los tipos propuestos (húmedo, medio y seco). Debido a esta indeterminación no pueden ser utilizados los parámetros para valores habituales expuestos en la **Tabla n° 2** y es necesario redefinir nuevos parámetros para esta situación.

De modo esquemático la caracterización en régimen alterado en situación de no coetaneidad se llevará a cabo del modo siguiente:

- La caracterización de valores habituales se realizará según unos parámetros específicos para no coetaneidad, expuestos en la **Tabla n° 10: H1-H9**. La definición y el procedimiento de cálculo de estos nuevos parámetros se presenta en el epígrafe **C.1**.
- La caracterización de valores extremos en régimen alterado, al no exigir la condición de coetaneidad en ambas series, se desarrollará según los parámetros **P5-P19** ya expuestos en la **Tabla n°2**.



Tabla nº 10: RELACIÓN DE PARÁMETROS DE VALORES HABITUALES (H1-H9; P4) A ESTIMAR EN RÉGIMENES ALTERADOS que no dispongan de la serie natural coetánea

ASPECTO		PARÁMETROS	
VALORES HABITUALES	APORTACIONES ANUALES	MAGNITUD	Nº medio de días al mes con $q < Q 95\%$
			Mediana (H2)
			Coeficiente de variación (H3)
	APORTACIONES MENSUALES	MAGNITUD	Media del mes: 12 valores (H4)
			Mediana del mes: 12 valores (H5)
			Coeficiente de variación del mes: 12 valores (H6)
		ESTACIONALIDAD	Variabilidad extrema (H7)
		Frecuencia relativa de máximos para cada mes: 12 valores (H8)	
		Frecuencia relativa de mínimos para cada mes: 12 valores (H9)	
	CAUDALES DIARIOS	VARIABILIDAD	Diferencia entre los caudales medios correspondientes a los percentiles de excedencia del 10% y 90% (P4)

COMENTARIOS

- Según la naturaleza de los datos facilitados, la aplicación calcula:
 - el total de parámetros H1-H9 y P4, si se han facilitado datos diarios
 - todos los parámetros salvo P4, si sólo se han facilitado datos mensuales
- El parámetro P4 es análogo al definido en el caso general (Tabla nº 2)
- Para la caracterización de avenidas y seguías se emplean los parámetros para ya definidos para el caso general (15 parámetros) P5-P19 especificados en la Tabla nº 2, ya que su cálculo no está vinculado a la disponibilidad de datos coetáneos



C.2.1 PARÁMETROS PROPUESTOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE VALORES HABITUALES

Los parámetros propuestos para la caracterización de valores habituales en régimen alterado no coetáneo son los siguientes

C.2.1.1.- VALORES ANUALES

MAGNITUD Y VARIABILIDAD

Parámetros propuestos:

H1: MEDIA DE LAS APORTACIONES ANUALES

H2: MEDIANA DE LAS APORTACIONES ANUALES

H3: COEFICIENTE DE VARIACIÓN

Referente a valores anuales se calcula para el total de años de la serie alterada la media, la mediana y el coeficiente de variación de las aportaciones anuales correspondientes.

C.2.1.2.- VALORES MENSUALES

MAGNITUD Y VARIABILIDAD

Parámetros propuestos:

H4: MEDIA DE LAS APORTACIONES MENSUALES

H5: MEDIANA DE LAS APORTACIONES MENSUALES

H6: COEFICIENTE DE VARIACIÓN

H7: VARIABILIDAD EXTREMA

Referente a valores mensuales se calcula para cada mes la media, la mediana y el coeficiente de variación de las aportaciones mensuales correspondientes al total de datos disponibles de la serie alterada.

La variabilidad extrema se caracteriza como la diferencia entre la máxima y mínima aportación habida en el año. La evaluación se realizará año a año para cada uno de los años de la serie alterada. El procedimiento se centra en estimar cual es la diferencia existente en términos de aportación, entre el máximo y mínimo mensual de un año (A en la Figura nº 6)

$$H7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Am \text{ máxima} - Am \text{ mínima}) \text{ año } i$$

donde: **Am máxima** = aportación mensual máxima en el año i
Am mínima = aportación mensual mínima en el año i
N = nº de años disponible

ESTACIONALIDAD

Parámetros propuestos:

H8: ESTACIONALIDAD DE MÁXIMOS

H9: ESTACIONALIDAD DE MÍNIMOS

H8 se obtendría para cada mes como la frecuencia relativa o probabilidad de que en ese mes se localice la aportación mensual máxima del año.

$$H8 \text{ mes } i = \frac{\text{nº de años en los que el máximo mensual se localiza en el mes } i}{\text{nº total de años}}$$

De modo análogo se calcula la probabilidad de que en ese mes se localice la aportación mensual mínima del año:

$$H9 \text{ mes } i = \frac{\text{nº de años en los que el mínimo mensual se localiza en el mes } i}{\text{nº total de años}}$$

El resultado final será una tabla en la que aparezca representado para cada mes del año su frecuencia relativa de máximos y de mínimos.

C.2.1.3.- VALORES DIARIOS

VARIABILIDAD

Parámetro propuesto **P4: INTERVALO COMPRENDIDO ENTRE LOS CAUDALES MEDIOS DIARIOS CORRESPONDIENTES A LOS PERCENTILES DE EXCEDENCIA DEL 10% Y 90%, $Q_{10}-Q_{90}$**

Este parámetro es similar al ya definido en el epígrafe **B.2.1.2**



D ÍNDICES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA: ASPECTOS GENERALES

D.1 ÍNDICES PARCIALES

Habiendo constatado en los epígrafes anteriores el papel vertebrador que juega el régimen natural de caudales en el funcionamiento del ecosistema fluvial, es fundamental conocer en qué grado el régimen actualmente circulante, distinto del natural (**régimen alterado**) o cualquier otro régimen propuesto (por ejemplo un **régimen ambiental**) difieren o se asemejan al natural, dado que estas analogías y diferencias revertirán en la integridad del ecosistema fluvial.

Con el objetivo de evaluar esta alteración se proponen un conjunto de índices numéricos, denominados **Índices de Alteración Hidrológica (IAH)**, que abordando los aspectos anteriormente expuestos, evalúen la distorsión originada en los caudales circulantes respecto a la situación natural:

- Si las series disponibles en natural y alterado cumplen la condición de coetaneidad (al menos 15 años comunes), la evaluación de la alteración se realizará según los índices recogidos en la **Tabla nº 11**. La explicación detallada de estos índices se recoge en el **epígrafe E**.

- En el caso de análisis de alteración en situación de no coetaneidad, los índices para valores habituales difieren de los anteriores, proponiéndose los recogidos en la **Tabla nº 12**. La explicación detallada de los mismos puede consultarse en el **epígrafe F**.

Tabla nº 11: RELACIÓN DE ÍNDICES DE ALTERACIÓN (IAH 1- IAH 21) PARA REGÍMENES COETÁNEOS

ASPECTO		CODIGO	DENOMINACIÓN	Parámetro del que proviene	
VALORES HABITUALES	MAGNITUD	IAH 1	Magnitud de las aportaciones anuales	P1	
		IAH 2	Magnitud de las aportaciones mensuales		
	VARIABILIDAD	IAH 3	Variabilidad habitual	P4	
		IAH 4	Variabilidad extrema	P2	
	ESTACIONALIDAD	IAH 5	Estacionalidad de máximos	P3	
		IAH 6	Estacionalidad de mínimos		
AVENIDAS	MAGNITUD Y FRECUENCIA	IAH 7	Magnitud de las avenidas máximas	P5	
		IAH 8	Magnitud del Caudal Generador del Lecho	P6	
		IAH 9	Magnitud del Caudal de conectividad	P7	
		IAH 10	Magnitud de las avenidas habituales	P8	
	VARIABILIDAD	IAH 11	Variabilidad de las avenidas máximas	P9	
		IAH 12	Variabilidad de las avenidas habituales	P10	
	DURACION	IAH 13	Duración de avenidas	P11	
	ESTACIONALIDAD	IAH 14	Estacionalidad de avenidas (12 valores, uno para cada mes)	P12	
	SEQUÍAS	MAGNITUD Y FRECUENCIA	IAH 15	Magnitud de las sequías extremas	P13
			IAH 16	Magnitud de las sequías habituales	P14
VARIABILIDAD		IAH 17	Variabilidad de las sequías extremas	P15	
		IAH 18	Variabilidad de las sequías habituales	P16	
DURACION		IAH 19	Duración de sequías	P17	
ESTACIONALIDAD		IAH 20	Nº de días con caudal nulo (12 valores, uno para cada mes)	P18	
		IAH 21	Estacionalidad de sequías (12 valores, uno para cada mes)	P19	

21 ÍNDICES

	Índice desglosado por tipo de año, como resumen se ofrece el valor ponderado
	Índice especificado a nivel mensual, como resumen se ofrece la media anual



EXPRESIÓN GENERAL

Conceptualmente los Índices de Alteración pueden definirse como cociente entre el valor del parámetro de caracterización en un régimen alterado y el valor de ese mismo parámetro en régimen natural⁴:

$$\text{Índice de Alteración} = \frac{\text{Valor del parámetro en Rég. Alterado}}{\text{Valor del parámetro en Rég. Natural}}$$

Esta expresión debe recogerse en un sentido estrictamente teórico y conceptual. En la práctica este "cociente entre parámetros" se modula o matiza en función de las características y peculiaridades de los aspectos a evaluar.

En la **Tabla nº 10**, los cuatro índices relativos a la estacionalidad (**IAH 5**, **IAH 6**, **IAH 14**, e **IAH 21**) escapan de esta expresión general y sus particularidades serán analizadas con más detalle posteriormente.

Cuando se trabaja con parámetros que discriminan según el tipo de año (por ejemplo los relativos a valores habituales), los índices correspondientes (**IAH 1 –IAH 6**) se calculan en una primera etapa de forma independiente para cada tipo de año. Una vez obtenidos los valores Índice año húmedo, Índice año medio e Índice año seco se obtiene el valor final del índice como media ponderada según el porcentaje de presencia de cada tipo de año en la serie:

CÁLCULO DEL VALOR FINAL DE LOS ÍNDICES QUE DISCRIMINAN SEGÚN EL "TIPO DE AÑO"

$$\text{ÍNDICE} = 0,25 * \text{Índice}^{\text{húmedo}} + 0,5 * \text{Índice}^{\text{medio}} + 0,25 * \text{Índice}^{\text{seco}}$$

Dado que la discriminación en tipos de años (ver Anexo I) presupone que:

- Un año húmedo se presenta como promedio el 25% de las veces
- Un año medio se presenta un 50% de las veces
- Un año seco se presenta un 25% de las veces

Tabla nº 12: RELACIÓN DE ÍNDICES DE ALTERACIÓN PARA REGÍMENES NO COETÁNEOS

ASPECTO		CODIGO	DENOMINACIÓN	Parámetro del que proviene	
VALORES HABITUALES	MAGNITUD	M1	Magnitud de las aportaciones anuales	H1	
		M2	Magnitud de las aportaciones mensuales	H4	
		M3	Magnitud de las aportaciones de cada mes: 12 valores	H4	
	VARIABILIDAD	V1	Variabilidad de las aportaciones anuales	H3	
		V2	Variabilidad de las aportaciones mensuales	H6	
		V3	Variabilidad de las aportaciones de cada mes: 12 valores	H6	
		V4	Variabilidad extrema	H7	
		IAH 3	variabilidad habitual	P4	
	ESTACIONALIDAD	E1	Estacionalidad de máximos	H8	
E2		Estacionalidad de mínimos	H9		
AVENIDAS	MAGNITUD Y FRECUENCIA	IAH 7	Magnitud de las avenidas máximas	P5	
		IAH 8	Magnitud del Caudal Generador del Lecho	P6	
		IAH 9	Magnitud del Caudal de conectividad	P7	
		IAH 10	Magnitud de las avenidas habituales	P8	
	VARIABILIDAD	IAH 11	Variabilidad de las avenidas máximas	P9	
		IAH 12	Variabilidad de las avenidas habituales	P10	
	DURACION	IAH 13	Duración de avenidas	P11	
	ESTACIONALIDAD	IAH 14	Estacionalidad de avenidas (12 valores, uno para cada mes)	P12	
	SEQUÍAS	MAGNITUD Y FRECUENCIA	IAH 15	Magnitud de las sequías extremas	P13
			IAH 16	Magnitud de las sequías habituales	P14
VARIABILIDAD		IAH 17	Variabilidad de las sequías extremas	P15	
		IAH 18	Variabilidad de las sequías habituales	P16	
DURACION		IAH 19	Duración de sequías	P17	
		IAH 20	Nº de días con caudal nulo (12 valores, uno para cada mes)	P18	
ESTACIONALIDAD		IAH 21	Estacionalidad de sequías (12 valores, uno para cada mes)	P19	

25 ÍNDICES

- Índices similares a los ya definidos para series coetáneas
- Índice especificado a nivel mensual, como resumen se ofrece la media anual

⁴ Puede observarse la concordancia con las recomendaciones del CIS-WDF, 2003 referente a los EQR (*Ecological Quality Ratios*). Ver Figura nº 20..



RANGO E INTERPRETACIÓN

Todos los índices propuestos están acotados inferiormente por 0, no estando definido a priori su límite superior.

$$0 < \text{INDICE} < \text{límite superior (habitualmente = 1)}$$

Con el objetivo de trabajar siempre con índices acotados entre 0 y 1, en aquellas situaciones en que $\text{IAH} > 1$, se sustituirá el valor obtenido por su inverso. De este modo se consigue no modificar la proporcionalidad en la alteración de un régimen respecto a otro y sin embargo se evitan las compensaciones que se producirían en el cálculo de la alteración global al trabajar con índices mayores y menores que 1.

Interpretación:

- Un valor de $\text{IAH} = 0$ es indicativo de **alteración máxima**
- Un valor de $\text{IAH} = 1$ es indicativo de **ausencia de alteración**
- A medida que un índice va tomando valores superiores a 1, es indicativo de un aumento en la alteración (alcanzando en este caso el parámetro evaluado en régimen alterado un valor superior al correspondiente en régimen natural).

D.2. ÍNDICES DE ALTERACIÓN GLOBAL

Una vez han sido calculados los índices $\text{IAH } 1$ a $\text{IAH } 21$, es necesario obtener una cuantificación global que aúne el resultado de los índices relativos a cada componente del régimen de caudales (valores habituales, avenidas y sequías)

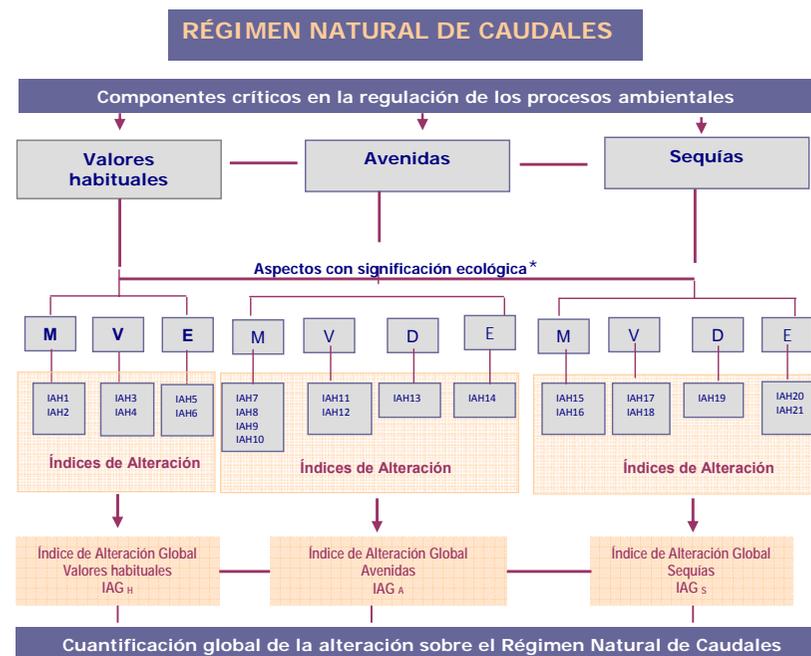
Se define así el Índice de Alteración Global (**IAG**) como índice integrador de aquellos índices parciales que evalúan la alteración sobre los diferentes aspectos de un componente del régimen de caudales.

Existirán por consiguiente tres índices globales:

IAG_H: Índice de Alteración Global sobre valores habituales, obtenido a partir de los índices de alteración $\text{IAH } 1$ a $\text{IAH } 6$

IAG_A: Índice de Alteración Global sobre avenidas, obtenido a partir de los índices de alteración $\text{IAH } 7$ a $\text{IAH } 14$

IAG_S: Índice de Alteración Global sobre sequías, obtenido a partir de los índices de alteración $\text{IAH } 15$ a $\text{IAH } 21$



*Aspectos del régimen de caudales con significación ecológica: **M** = magnitud, **V** = variabilidad, **D** = duración, **E** = Estacionalidad

Figura n° 17- Esquema del proceso de valoración de la alteración hidrológica



Es obvio que el cálculo del **IAG** correspondiente a un determinado componente exige el cálculo previo de los índices de alteración correspondientes. ejemplo, supongamos que la estimación en régimen alterado de los índices **IAH_j- IAH_k- IAH_l - IAH_m- IAH_n- IAH_p - IAH_q** arroja los valores **a_j- a_k- a_l - a_m- a_n- a_p - a_q** tal y como se recoge en la tabla de la **Fig. n° 18**. Puede observarse en esta Figura que el valor asignado a cualquier índice en régimen natural es 1, por ser esta cifra indicativa de la ausencia de alteración.

La representación gráfica de estas dos series de valores en un plano con tantos ejes como índices, daría como resultado dos recintos poligonales, donde la línea azul corresponde a los valores obtenidos para régimen natural (1 para todos ellos) y la línea roja a los obtenidos en régimen alterado (**a_j - a_k- a_l - a_m- a_n- a_p - a_q** respectivamente).

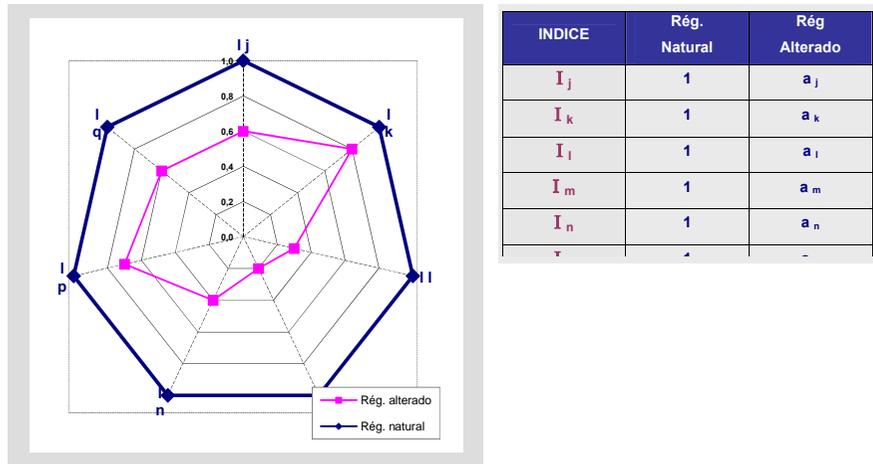


Figura n° 18- Cálculo del Índice de Alteración Global (IAG) a partir de los índices parciales (IAH)

Dada una secuencia determinada de los Índices de alteración (por ejemplo la secuencia **IAH_j- IAH_k- IAH_l - IAH_m- IAH_n- IAH_p - IAH_q**), el **IAG** correspondiente se calcula como el cociente entre el área definida por el polígono del régimen alterado y la correspondiente al polígono del régimen natural, pudiendo obtenerse fácilmente con la expresión:

$$\text{Índice de Alteración Global} = \frac{S_{\text{Alt}}}{S_{\text{Nat}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} a_i * a_{i+1} * \text{sen} \frac{2\pi}{n}}{n * \left[\frac{1}{2} \text{sen} \frac{2\pi}{n} \right]} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i * a_{i+1}}{n} \quad \text{Ec.1}$$

siendo:

S Alt: superficie definida por el polígono en régimen alterado
S Nat: superficie definida por el polígono en régimen natural

a_i : valor del índice **IAH_i** en régimen alterado
a_{i+1} : valor del índice **IAH_{i+1}** en régimen alterado

n = n° de índices de alteración que evalúan un aspecto del régimen de caudales

El IAG así definido es dependiente de la ordenación relativa de los índices I_i.

Para evitar esta indeterminación se redefine el Índice de Alteración Global (**IAG**) como el valor medio de los índices globales correspondientes a las diferentes posibilidades de ordenación relativa de los **n** índices parciales. En adelante se denominará con las siglas **iag** al índice de alteración global obtenido para una postura determinada de los índices de alteración I_i.

Si suponemos **n** índices **IAH_i**, existirán **n!** índices **iag** correspondientes a las **n!** posibilidades de ordenación.

$$IAG = \frac{\sum_{j=1}^{n!} iag_j}{n!} = \frac{\sum_{j=1}^{n!} \sum_{i=1}^n \frac{a_i^j * a_{i+1}^j}{n}}{n!} = \frac{\sum_{j=1}^{n!} \sum_{i=1}^n a_i^j * a_{i+1}^j}{n * n!} \quad \text{Ec. 2}$$

donde:

IAG = media de los **n!** valores de **iag**

a_i^j = valor de Índice que ocupa el eje **i**-ésimo en la **j**-ésima postura de los ejes

denominando **a_i^j = b_p** y **a_{i+1}^j = b_k**

cada producto **b_p * b_k** puede aparecer un total de **2 n (n-2)!** veces

– hay un total de $\binom{n}{2}$ parejas posibles **b_p * b_k** –

Nota aclaratoria: suponiendo **b_p** en el 1º eje y **b_k** en el 2º eje, los (n-2) ejes restantes podrán ordenarse de (n-2)! formas distintas. Para **b_k** en el 1º eje y **b_p** en el 2º eje, aparecerán otras (n-2)! posibles ordenaciones de los ejes restantes. Por último la pareja **b_p* b_k** rotará desde el eje 1º hasta al eje n, ocupando por tanto n posiciones distintas.



por consiguiente en el numerador de la Ec 2, cada posible factor $a_i^j * a_{i+1}^j$ aparecerá un total de $2(n-2)!$ veces :

$$IAG = \frac{\sum_{i,j=1 \neq j}^n a_i * a_j * 2(n-2)!n}{n * n!} = \frac{2 \sum_{i,j=1 \neq j}^n a_i * a_j}{n(n-1)} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i\right)^2 - \sum_{i=1}^n a_i^2}{n(n-1)} \quad \text{Ec. 3}$$

obteniéndose la expresión final del IAG como:

$$IAG = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i\right)^2 - \sum_{i=1}^n a_i^2}{n(n-1)} \quad \text{Ec. 4}$$

donde:

a_i : valor que toma el índice IAH i en Régimen Alterado

n = nº de Índices de Alteración que evalúan un aspecto del régimen de caudales

Particularizando para los tres Índices de Alteración Global propuestos:

$$IAG_H = \frac{\left(\sum_{i=1}^7 a_i\right)^2 - \sum_{i=1}^7 a_i^2}{7(7-1)}$$

Índice de Alteración Global de valores habituales IAG_H, obtenido en base a los Índices de Alteración IAH 1 a IAH 6

$$IAG_A = \frac{\left(\sum_{i=8}^{16} a_i\right)^2 - \sum_{i=8}^{16} a_i^2}{9(9-1)}$$

Índice de Alteración Global de avenidas IAG_V, obtenido en base a los Índices de Alteración IAH 7 a IAH 14

$$IAG_S = \frac{\left(\sum_{i=17}^{24} a_i\right)^2 - \sum_{i=17}^{24} a_i^2}{8(8-1)}$$

Índice de Alteración Global de sequías IAG_S, obtenido en base a los Índices de Alteración IAH 15 a IAH 21

El Índice de Alteración Global, así definido esta acotado (al igual que los índices parciales IAH_i) entre 0 y 1:

$$0 \leq IAG \leq 1$$

Se comprueba que expresar IAG como una relación entre superficies motiva que este índice global no varíe linealmente con los índices parciales. Si todos los índices de alteración parcial tuviesen el mismo valor, K, el IAG valdría K². Como K≤1, el IAG<K salvo para los casos

extremos de K=1 ó K=0. En la Figura nº 19 se aprecia la variación del valor de IAG respecto al rango de variación de K.

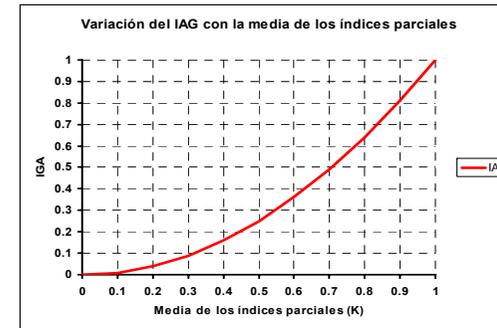


Figura nº 19. Variación del Índice de Alteración Global (IAG) respecto al valor medio K de los índices parciales

La relación cuadrática entre K e IAG, $IAG=K^2$ siendo $0 \leq K \leq 1$, implica que aunque IAG también varíe entre 0 y 1 difícilmente tomará valores altos –por ejemplo, para $K=0,70$ $IAG=0,5-$ y en términos relativos la disminución del valor de IAG respecto al de K es mayor cuanto menor es K, como puede apreciarse al expresar el IAG como porcentaje respecto al correspondiente valor de K (Tabla nº 14).

K	IAG	% IAG respecto a K
0.1	0.01	10
0.2	0.04	20
0.3	0.09	30
0.4	0.16	40
0.5	0.25	50
0.6	0.36	60
0.7	0.49	70
0.8	0.64	80
0.9	0.81	90

Tabla nº 14. Porcentaje del Índice de Alteración Global (IAG) respecto al valor medio K de los índices parciales

D.3. DEFINICIÓN DEL ESTATUS HIDROLÓGICO

Con el objetivo de ofrecer una valoración no sólo cuantitativa sino también cualitativa del grado de alteración, se proponen cinco niveles o estados de alteración hidrológica, denominados **estatus hidrológicos**, definidos siguiendo las recomendaciones respecto a niveles y asignación de colores (Figura nº 20) recogida en CIS-WFD, 2003 (*EU Common Implementation Strategy*



(CIS) for the Water Framework Directive) en su epígrafe 2.6 para la clasificación del denominado *status ecológico* a partir de los Ecological Quality Ratios (EQR).

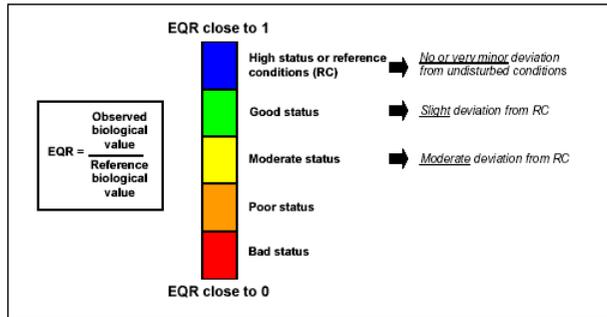


Figura nº 20 - Principios básicos para la clasificación del status ecológico basada en los denominados EQR Ecological Quality Ratios (fuente: CIS-WDF, 2003)

Conviene señalar dos fuertes analogías entre los EQR y los índices de alteración propuestos en este trabajo:

- en ambos casos, la valoración de la alteración se realiza comparando el valor que toma un determinado parámetro en la situación alterada y la correspondiente al estado natural o de referencia.
- El intervalo de variación está acotado entre 0 y 1, correspondiendo a 1 la situación óptima (mínima alteración) y a 0 la más degradada o de máxima alteración.

Adoptando una distribución equitativa de las cinco clases propuestas entre 0 y 1, la Tabla nº 15 resume los criterios de representación y asignación de los diferentes *estatus* o *niveles hidrológicos* deducidos de los índices parciales:

ESTATUS HIDROLÓGICO: INDICES PARCIALES (IAH)				
1	2	3	4	5
EXCELENTE	BUENO	MODERADO	DEFICIENTE	MUY DEF
$0,8 < IAH \leq 1$	$0,6 < IAH \leq 0,8$	$0,4 < IAH \leq 0,6$	$0,2 < IAH \leq 0,4$	$0 \leq IAH \leq 0,2$

Tabla nº 15- Código de colores y valores correspondientes de los índices de alteración parciales (IAH) para los diferentes estatus hidrológicos

Respecto a los índices de alteración global, recordando la relación cuadrática existente entre IAH e IAG - $IAG = f(I^2)$ (Figura nº 19)- se obtendrían los siguientes criterios de representación y asignación (Tabla nº 16):

ESTATUS HIDROLÓGICO: INDICES GLOBALES (IAG)				
1	2	3	4	5
EXCELENTE	BUENO	MODERADO	DEFICIENTE	MUY DEFICIENTE
$0,64 < IAG \leq 1$	$0,36 < IAG \leq 0,64$	$0,16 < IAG \leq 0,36$	$0,04 < IAG \leq 0,16$	$0 \leq IAG \leq 0,04$

Tabla nº 16- Código de colores y valores correspondientes de los índices de alteración global (IAG) para los diferentes estatus hidrológicos



E ÍNDICES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA EN REGIMÉNES COETÁNEOS: DEFINICIONES

A continuación se presentarán cada uno de los índices según el siguiente esquema:

IAH _j : DENOMINACIÓN DEL ÍNDICE	
Objetivo:	se describe qué pretende evaluarse con el índice
Expresión:	se incluye la ecuación que permite calcular el índice
Comentario:	en algunos casos, se recoge un breve texto que aclara o amplía algunos aspectos de interés.

E.1 ÍNDICES DE ALTERACIÓN DE VALORES HABITUALES

Los índices propuestos para la estimación de la alteración en los diferentes aspectos con significación ambiental (magnitud, variabilidad y estacionalidad) de los valores habituales (diarios, anuales y mensuales) del régimen de caudales quedan recogidos en la **Tabla. nº 17**:

ASPECTO	INDICE	DENOMINACIÓN
Valores habituales		
magnitud	IAH 1	Ind. de Magnitud de las aportaciones anuales
	IAH 2	Ind. de Magnitud de las aportaciones mensuales
variabilidad	IAH 3	Ind. de Variabilidad habitual
	IAH 4	Ind. de Variabilidad extrema
estacionalidad	IAH 5	Ind. de Estacionalidad de máximos
	IAH 6	Ind. de Estacionalidad de mínimos

Tabla nº 17- Índices para la estimación de la alteración de los valores habituales del régimen de caudales

IAH 1: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS APORTACIONES ANUALES

Objetivo: evaluar la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la magnitud de las aportaciones anuales respecto a su valor en régimen natural

Expresión:

$$IAH1^z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\frac{(AA \text{ año } i)^a}{(AA \text{ año } i)^n} \right]^z \quad \text{para } z = \text{húmedo, medio y seco}$$

donde:

k = nº de años perteneciente al tipo z

(AA) a = Aportación anual en régimen alterado.

(AA) n = Aportación anual en régimen natural

Se obtendrán por tanto tres índices de magnitud **IAH 1^{hum}**, **IAH 1^{med}** y **IAH 1^{sec}** para años húmedos, medios y secos respectivamente

El valor final del índice **IAH 1** se obtendrá ponderando estos tres índices parciales por el % de presencia de cada tipo de año en la serie global (25% para húmedos y secos y 50% para años medios).

$$IAH 1 = 0,25 * IAH 1^{hum} + 0,5 * IAH 1^{med} + 0,25 * IAH 1^{sec}$$

Comentario: Como puede observarse la comparación entre un régimen y otro se evalúa año a año y posteriormente se calcula el valor medio de estas alteraciones anuales observadas. De este modo se evita la compensación interanual que se produciría al calcular la alteración como cociente de las aportaciones medias anuales en ambos regímenes.

IAH 2: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS APORTACIONES MENSUALES

Objetivo: Con el objetivo de evitar las compensaciones que se pueden producir entre los distintos meses del año cuando se trabaja con valores anuales, se propone este segundo índice que mitiga lo anterior al dotar del mismo peso a la alteración habida cada mes.

Expresión: La evaluación de la alteración se realizará por tanto mes a mes, para cada mes de cada año perteneciente a cada tipo (húmedo, medio y seco). El índice se expresará finalmente como el valor medio de todas las alteraciones mensuales estimadas.



$$IAH 2^z = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \left[\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \frac{(Am_{mes\ i,\ año\ j})_a}{(Am_{mes\ i,\ año\ j})_n} \right]^z \text{ para } z = \text{húmedo, medio y seco}$$

donde:

$k = n^{\circ}$ de años perteneciente al tipo z

$(Am_{mes\ i,\ año\ j})_a$ = Aportación mensual correspondiente al mes i del año j en régimen alterado

$(Am_{mes\ i,\ año\ j})_n$ = Aportación mensual correspondiente al mes i del año j en régimen natural

El valor final del índice I_2 se obtendrá ponderando $IAH 2^{hum}$, $IAH 2^{med}$, $IAH 2^{sec}$ según el % de presencia de cada tipo de año:

$$IAH 2 = 0,25 * IAH 2^{hum} + 0,5 * IAH 2^{med} + 0,25 * IAH 2^{sec}$$

IAH 3: ÍNDICE DE VARIABILIDAD HABITUAL

Objetivo: evaluar la distorsión que en variabilidad habitual presenta un régimen alterado frente al natural, entendiendo por variabilidad habitual la que prescinde de los valores extremos que se presentan en el año.

Expresión:

$$IAH 3^z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(Q_{10} - Q_{90})_{año\ i,a}}{(Q_{10} - Q_{90})_{año\ i,n}} \text{ para } z = \text{húmedo, medio y seco}$$

donde:

$k = n^{\circ}$ de años de la serie disponible pertenecientes al tipo z

Q_{10} = Caudal correspondiente al percentil de excedencia del 10% en la curva media de caudales clasificados del tipo z

Q_{90} = Caudal correspondiente al percentil de excedencia del 90% en la curva media de caudales clasificados del tipo z

Los subíndices a y n hacen referencia al régimen alterado y natural respectivamente.

IAH 4: ÍNDICE DE VARIABILIDAD EXTREMA

Objetivo: evaluar la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la variabilidad extrema de los valores habituales respecto al régimen natural.

Expresión:

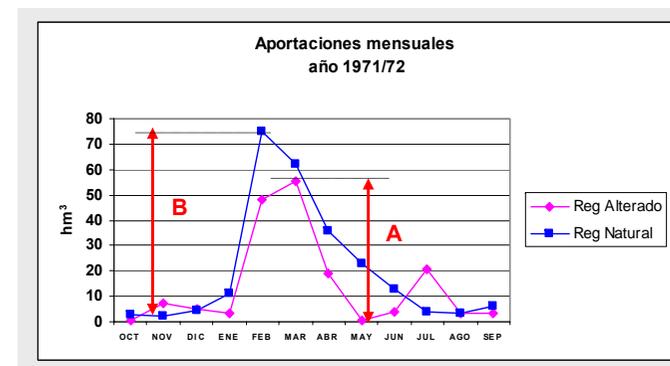


Figura n° 21 – Evaluación del índice de variabilidad o de diferencias extremas en una año determinado
A= Aportación mensual máxima – Aportación mensual mínima en régimen alterado
B= Aportación mensual máxima – Aportación mensual mínima en régimen natural

$$IAH 4^z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\frac{(Am_{máxima} - Am_{mínima})_{año\ i,a}}{(Am_{máxima} - Am_{mínima})_{año\ i,n}} \right]^z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left[\frac{A}{B} \right]^z$$

para $z =$ húmedo, medio y seco

$k = n^{\circ}$ de años perteneciente al tipo z

$Am_{máxima}, año\ i, a$ = Aportación mensual máxima del año i en régimen alterado.
 Análogamente para $Am_{mínima}$ año i, a .

$Am_{máxima}, año\ i, n$ = Aportación mensual máxima del año i en régimen natural.

Análogamente para $Am_{mínima}, año\ i, n$.

El valor final del índice $IAH 4$ se obtiene ponderando los índices correspondientes a cada tipo de año según el % de presencia del tipo en la serie:

$$IAH 4 = 0,25 * IAH 4^{hum} + 0,5 * IAH 4^{med} + 0,25 * IAH 4^{sec}$$



Comentario: Como puede observarse la comparación entre un régimen y otro se evalúa año a año y posteriormente se calcula el valor medio de estas alteraciones anuales observadas. De este modo se evita posibles compensaciones entre años de comportamientos diferentes.

IAH 5: INDICE DE ESTACIONALIDAD DE MÁXIMOS

IAH 6: INDICE DE ESTACIONALIDAD DE MÍNIMOS

Objetivo: evaluar la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la estacionalidad de las aportaciones mensuales naturales.

Expresión: la alteración en la estacionalidad de los mínimos para un año determinado, se estimará como el desfase existente (medido en nº de meses) entre el mes con mínima aportación en régimen alterado y el mes con mínima aportación en régimen natural (E_{min} en la **Figura nº 22**). Referente a los máximos, el desfase se evaluará entre el mes con máxima aportación en régimen alterado y el correspondiente en régimen natural para un año dado (E_{max} en la **Figura nº 22**).

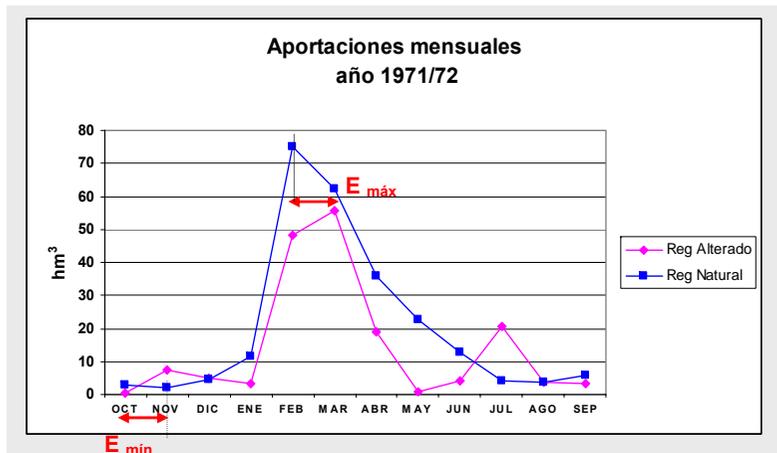


Figura nº 22 – Representación gráfica del significado del índice de estacionalidad o de desfase temporal para valores máximos y mínimos

Para cada tipo de año se obtendrá un desfase temporal de máximos $IAH 5^z$ y un desfase temporal de mínimos $IAH 6^z$, según las expresiones siguientes:

$$IAH 5^z = 1 - \frac{1}{6} \left[\frac{1}{k} \sum_{k=1}^k (n^{\circ} \text{ meses de desfase del máximo})_{\text{año } i} \right]^z$$

$$IAH 6^z = 1 - \frac{1}{6} \left[\frac{1}{k} \sum_{k=1}^k (n^{\circ} \text{ meses de desfase del mínimo})_{\text{año } i} \right]^z$$

para z= húmedo, medio y seco

k = nº de años perteneciente al tipo z

nº de meses de desfase del máximo = nº de meses de desfase entre el mes de máxima aportación en régimen alterado y el mes de máxima aportación en régimen natural para un año dado.

nº de meses de desfase del mínimo = nº de meses de desfase entre el mes de mínima aportación en régimen alterado y el mes de mínima aportación en régimen natural para un año dado.

Conviene hacer dos puntualizaciones en la estimación de estos parámetros:

- En la estimación del desfase de mínimos, puede ocurrir que la aportación mínima sea común a varios meses. En tal caso se seleccionará aquel mes que suponga el desfase máximo.
- No se considerarán desfases superiores a 6 meses, estando definido el índice de modo tal que para este desfase tome el valor de 0, indicativo de máxima alteración.
- Como puede observarse, los indicadores propuestos no responden a la expresión general de cociente entre parámetros. La razón de ello es la conveniencia de que el indicador elegido este siempre acotado entre 1 y 0.

En definitiva, para cada tipo de año, se obtendrán dos desfases, lo que supone un total de seis índices de estacionalidad (**Tabla nº 18**):



TIPO DE AÑO	DESFASE de (en base a)	INDICE de Estacionalidad
Año húmedo	Máximos (mes de aportación máxima)	IAH 5 ^{hum}
	Mínimos (mes de aportación mínima)	IAH 6 ^{hum}
Año medio	Máximos (mes de aportación máxima)	IAH 5 ^{med}
	Mínimos (mes de aportación mínima)	IAH 6 ^{med}
Año seco	Máximos (mes de aportación máxima)	IAH 5 ^{sec}
	Mínimos (mes de aportación mínima)	IAH 6 ^{sec}

Tabla n° 18- Denominación del índice de estacionalidad para máximos y mínimos correspondiente a cada tipo de año

El valor final de los índices IAH 5 e IAH 6, de estacionalidad de máximos y mínimos respectivamente se obtiene ponderando en base al porcentaje de presencia de cada tipo de año en la serie:

$$IAH\ 5 = 0,25 * IAH\ 5^{hum} + 0,5 * IAH\ 5^{med} + 0,25 * IAH\ 5^{sec}$$

$$IAH\ 6 = 0,25 * IAH\ 6^{hum} + 0,5 * IAH\ 6^{med} + 0,25 * IAH\ 6^{sec}$$

Comentario: dada su especial significación se procede a interpretar el resultado obtenido con estos índices, estableciendo las correspondencias existentes entre valor obtenido al calcular IAH 5 ó IAH 6 y el número de meses de desfase existente entre ambos regímenes (Tabla n° 19).

Interpretación	
Valor de IAH	Desfase
0	6 meses
0,17	5 meses
0,33	4 meses
0,5	3 meses
0,67	2 meses
0,83	1 mes
1	Sin desfase

Tabla n° 19- Interpretación de los resultados de los índices de estacionalidad IAH 5 ó IAH 6



E.2 ÍNDICES DE ALTERACIÓN DE AVENIDAS

Los índices propuestos para la estimación de la alteración en magnitud, frecuencia, variabilidad, estacionalidad y duración de las avenidas quedan recogidos en la **Tabla n° 20**.

El estudio de las tasas de crecida y defluencia no está enfocado a la formulación de un índice de alteración, sino a la caracterización de las tasas máximas relativas que se presentan en régimen natural con el objeto de caracterizarlas y de servir de ayuda al gestor del recurso como patrón de comportamiento límite en la implementación de avenidas.

ASPECTO	INDICE	DENOMINACIÓN
Valores extremos máximos: avenidas		
magnitud y frecuencia	IAH 7	Ind. de Magnitud de las avenidas máximas
	IAH 8	Ind. de Magnitud del caudal generador del lecho
	IAH 9	Ind. de Magnitud del caudal de conectividad
	IAH 10	Ind. de Magnitud de las avenidas habituales
variabilidad	IAH 11	Ind. de Variabilidad de las avenidas máximas
	IAH 12	Ind. de Variabilidad de las avenidas habituales
duración	IAH 13	Ind. de Duración de avenidas
estacionalidad	IAH 14	Ind. de Estacionalidad & Duración de avenidas

Tabla n° 20- Índices para la estimación de la alteración de avenidas del régimen de caudales

IAH 7: INDICE DE MAGNITUD DE LAS AVENIDAS MÁXIMAS

Objetivo: evaluar la alteración en el valor medio de las avenidas circulantes

Expresión: El índice propuesto evalúa la alteración en magnitud de las avenidas máximas tomando como parámetro el valor medio de la serie de máximos caudales medios diarios anuales en uno y otro régimen.

$$IAH 7 = \frac{(\overline{Qc})_a}{(\overline{Qc})_n}$$

$(\overline{Qc})_a$ = media de los máximos caudales medios diarios anuales de la serie disponible en régimen alterado

$(\overline{Qc})_n$ = media de los máximos caudales medios diarios anuales de la serie disponible en régimen natural

Comentario: el valor obtenido con este índice es representativo de la alteración producida en el valor medio de los caudales máximos circulantes (Máximos Caudales Medios Diarios Anuales), pudiendo considerarse indicativo también de la alteración en la frecuencia de estas avenidas, dada la relación existente entre (\overline{Qc}) y el período de retorno. Al valor medio de la serie de caudales medios diarios máximos anuales (\overline{Qc}) , le corresponde un período de retorno de 2,33 años, cuando se utiliza la ley de frecuencias Gumbel.

IAH 8: INDICE DE MAGNITUD DEL CAUDAL GENERADOR DEL LECHO

Objetivo: evaluar la alteración en el valor de aquellos caudales con especial significación geomorfológica

Expresión: Las referencias expuestas en epígrafes anteriores avalan la significación ambiental del caudal generador del lecho (Q_{GL}) como aquel caudal que a largo plazo realiza un mayor trabajo de movilización y transporte de materiales siendo responsable de la geomorfología del cauce tanto en sección como en planta. El índice propuesto toma como parámetro de referencia el caudal generador del lecho y corrige la relación obtenida con el exponente 0,5 habida cuenta de la relación directa entre la anchura del cauce y la raíz cuadrada de Q_{GL} ⁵.

$$IAH 8 = \left(\frac{Q_{GL} a}{Q_{GL} n} \right)^{0,5}$$

$Q_{GL} a$ = Caudal Generador del Lecho correspondiente al régimen alterado

$Q_{GL} n$ = Caudal Generador del Lecho correspondiente al régimen natural

IAH 9: INDICE DE MAGNITUD DEL CAUDAL DE CONECTIVIDAD

Objetivo: evaluar la alteración en el valor de aquellos caudales que garantizan una conexión periódica con la llanura de inundación

⁵ En la literatura especializada (Tabla n° 5) pueden encontrarse numerosos trabajos que permiten estimar los parámetros K_1 y b , en la relación empírica **Anchura del cauce = $K_1 * Q_{GL}^b$** , confirmándose en todos ellos que el exponente b toma un valor igual o muy próximo a 0,5. Por tanto el índice I_9 permite evaluar la alteración en la anchura del cauce, que es la variable geomorfológica que con frecuencia se utiliza como variable independiente para caracterizar el resto.



Expresión: en epígrafes anteriores se definió el **caudal de conectividad** Q_{CONEC} como el caudal representativo de aquellos valores máximos que garantizan la conexión cauce-llanura de inundación y están íntimamente ligados con la dinámica de la banda riparia.

La alteración en esta funcionalidad de los valores máximos se estima como cociente entre la frecuencia correspondiente al caudal de conectividad en régimen alterado y la frecuencia estimada para dicho caudal en régimen natural.

$$IAH9 = \frac{T_n(Q_{CONEC})}{T_a(Q_{CONEC})}$$

Q_{CONEC} = Caudal de conectividad en régimen natural (=caudal que duplica el período de retorno del caudal generador del lecho en dicho régimen)

$T_a(Q_{CONEC})$ = Período de retorno correspondiente al Caudal de Conectividad en régimen alterado

$T_n(Q_{CONEC})$ = Período de retorno correspondiente al Caudal de Conectividad en régimen natural

Siendo la distribución Gumbel la ley de frecuencias considerada para la caracterización de los caudales máximos.

El proceso de obtención de este índice puede esquematizarse:

1. Estimar Q_{GL} en régimen natural y su periodo de retorno correspondiente T (Ley Gumbel)
2. Calcular la magnitud del caudal de conectividad natural Q_{CONEC} definido como aquel caudal correspondiente a un período $2T$
3. Calcular la frecuencia que corresponde en régimen alterado al caudal de conectividad natural (Q_{CONEC})
4. Comparar las frecuencias de Q_{CONEC} en régimen alterado y natural.

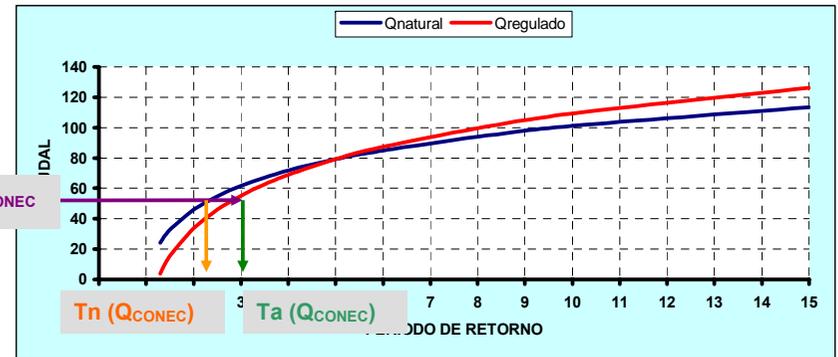


Figura n° II.24 – Asignación del período de retorno correspondiente al caudal de conectividad para el régimen natural y alterado

IAH 10: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS AVENIDAS HABITUALES

Objetivo: caracterizar la alteración en la magnitud de las avenidas, evitando trabajar sólo con valores extremos dado que enmascaran muchas avenidas menores de gran significación ambiental.

Expresión: en epígrafes anteriores se definió la avenida habitual como el caudal correspondiente en la curva media de caudales clasificados al percentil de excedencia del 5% ($Q_{5\%}$), constituyendo una nueva variable hidrológica que al representar fenómenos de recurrencia inferior al año sintetiza múltiples aspectos de funcionalidad biológica de los valores máximos.

El índice propuesto evalúa la alteración en el valor de la avenida habitual entre ambos regímenes:

$$IAH10 = \frac{(Ah)_a}{(Ah)_n}$$

$(Ah)_a$ = avenida habitual en régimen alterado.

$(Ah)_n$ = avenida habitual en régimen natural.

Comentario: Estando definida la avenida habitual por el valor del caudal (m^3/s) correspondiente al percentil de excedencia del 5% en la curva media de caudales clasificados,

lo que es análogo en términos de duración a aquel valor del caudal que como promedio es igualado o superado 18 días al año.

IAH 11: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS AVENIDAS MÁXIMAS

Objetivo: cuantificar la distorsión en la variabilidad interanual de los caudales máximos.

Expresión: el índice propuesto utiliza como estimador el coeficiente de variación de la serie de máximos caudales medios diarios anuales (Qc).

$$IAH11 = \frac{CV(Qc)_a}{CV(Qc)_n}$$

CV (Qc)_a = coeficiente de variación de la serie de máximos caudales medios diarios anuales correspondiente al régimen alterado.

CV (Qc)_n = coeficiente de variación de la serie de máximos caudales medios diarios anuales correspondiente al régimen natural.

IAH 12: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS AVENIDAS HABITUALES

Objetivo: cuantificar la distorsión en la variabilidad interanual de las avenidas habituales.

Expresión: el índice propuesto emplea como estimador el coeficiente de variación de la serie de valores Q_{5%} de los regímenes natural y alterado.

$$IAH12 = \frac{CV(Ah)_a}{CV(Ah)_n}$$

CV (Ah)_a = coeficiente de variación de la serie de valores correspondientes a la avenida habitual en régimen alterado (serie anual de Q_{5%}).

CV(Ah)_n = coeficiente de variación de la serie de valores correspondientes a la avenida habitual en régimen natural (serie anual de Q_{5%}).

IAH 13: ÍNDICE DE DURACIÓN DE AVENIDAS

Objetivo: comprobar si en régimen alterado los períodos de avenidas mantienen una duración análoga a los del régimen natural.

Expresión: el parámetro propuesto para caracterizar la duración de las avenidas ha sido definido en epígrafes anteriores como el máximo número de días consecutivos en que se iguala o supera el umbral del Q_{5%}.

Por consiguiente la alteración en la duración de avenidas se evalúa como cociente entre el valor de este parámetro en régimen alterado y su homólogo en natural.

$$IAH13 = \frac{(\text{Máximo n}^\circ \text{ de días consecutivos con } Q > Q_{5\%})_a}{(\text{Máximo n}^\circ \text{ de días consecutivos con } Q > Q_{5\%})_n}$$

(Máximo n° de días consecutivos con Q > Q_{5%})_a = Máximo número de días consecutivos, en valor medio, en el régimen alterado, en que se iguala o supera la avenida habitual natural.

(Máximo n° de días consecutivos con Q > Q_{5%})_n = Máximo número de días consecutivos, en valor medio, en el régimen natural, en que se iguala o supera la avenida habitual natural.

IAH 14: ÍNDICE DE ESTACIONALIDAD DE AVENIDAS

Objetivo: se propone este índice con el objetivo de evaluar la alteración en el aspecto de estacionalidad de las avenidas.

Expresión: al igual que en anteriores ocasiones se elige como caudal de referencia para discriminar la presencia o no de una avenida en un mes determinado el correspondiente al Q_{5%} en régimen natural.

El procedimiento se centra en evaluar la afección a la estacionalidad de las avenidas para cada mes del año y calcular posteriormente el índice de alteración como el promedio de estos índices mensuales.

El índice mensual IAH 14^{mes i} se obtiene siguiendo la lógica siguiente:

- Si ABS(natural-alterado) > 5 → IAH 14^{mes i} = 0
- Si ABS(natural-alterado) ≤ 5 → IAH14 mes i = $\frac{5 - \text{ABS}(\text{NATURAL} - \text{ALTERADO})}{5}$



donde

ABS: valor absoluto

NATURAL: nº medio de días al mes con $Q > Q_{5\%}$ en régimen natural para el mes considerado 5%

ALTERADO: nº medio de días al mes con $Q > Q_{5\%}$ en régimen alterado para el mes considerado 5%

Al final se ofrece un índice final **IAH 14** obtenido como media de los doce valores mensuales

E.3 ÍNDICES DE ALTERACIÓN DE SEQUÍAS

Los índices propuestos para la estimación de la alteración en magnitud, frecuencia, variabilidad, estacionalidad y duración de las sequías quedan recogidos en la **Tabla nº 21**.

ASPECTO	ÍNDICE	DENOMINACIÓN
Valores extremos mínimos: sequías		
magnitud y	IAH 15	Ind. de Magnitud de las sequías extremas
frecuencia	IAH 16	Ind. de Magnitud de las sequías habituales
variabilidad	IAH 17	Ind. de Variabilidad de las sequías extremas
	IAH 18	Ind. de Variabilidad de las sequías habituales
duración	IAH 19	Ind. de Duración de sequías
	IAH 20	Ind. de nº de días con caudal no nulo
estacionalidad	IAH 21	Ind. de Estacionalidad de sequías

Tabla nº 21- Índices para la estimación de la alteración de sequías del régimen de caudales

IAH 15: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS SEQUÍAS EXTREMAS

Objetivo: evaluar la alteración en el valor medio de los caudales mínimos circulantes

Expresión: el índice propuesto estima la alteración en magnitud de las sequías a partir de la relación existente entre el valor medio de las series de caudales diarios mínimos anuales correspondientes al régimen alterado y al régimen natural.

$$IAH 15 = \frac{\overline{(Q_s)_a}}{\overline{(Q_s)_n}}$$

donde:

$\overline{(Q_s)_a}$ = media de los caudales diarios mínimos anuales de la serie disponible en régimen alterado

$\overline{(Q_s)_n}$ = media de los caudales diarios mínimos anuales de la serie disponible en régimen natural

IAH 16: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS SEQUÍAS HABITUALES

Objetivo: evaluar la alteración en la magnitud de las sequías evitando trabajar sólo con valores mínimos extremos, dado que enmascaran otras situaciones que aun siendo menos críticas sean sin embargo de gran trascendencia ambiental



Expresión:

$$IAH 16 = \frac{(Sh)_a}{(Sh)_n}$$

$(Sh)_a$ = caudal (m³/s) correspondiente a la sequía habitual en régimen alterado.

$(Sh)_n$ = caudal (m³/s) correspondiente a la sequía habitual en régimen natural.

En ambos casos la sequía habitual vendrá definida por el valor del caudal correspondiente al percentil del 95% en la respectiva curva media de caudales clasificados, lo que es análogo, en términos de duración, a aquel valor del caudal, que como promedio no es igualado ni superado 18 días al año.

IAH 17: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS SEQUÍAS EXTREMAS

Objetivo: evaluar la alteración en la variabilidad de los caudales mínimos anuales.

Expresión: se utiliza como parámetro estimador el coeficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales correspondientes a cada uno de los regímenes.

$$IAH 17 = \frac{CV(Qs)_a}{CV(Qs)_n}$$

$CV(Qs)_a$ = coeficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales correspondiente al régimen alterado.

$CV(Qs)_n$ = coeficiente de variación de la serie de mínimos caudales diarios anuales correspondiente al régimen natural.

IAH 18: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS SEQUÍAS HABITUALES

Objetivo: evaluar la alteración en la variabilidad de las sequías más frecuentes.

Expresión: el índice propuesto utiliza como parámetro estimador el coeficiente de variación de la serie de valores $Q_{95\%}$ correspondientes a los dos regímenes en estudio.

$$IAH 18 = \frac{CV(Sh)_a}{CV(Sh)_n}$$

$CV(Sh)_a$ = coeficiente de variación de la serie anual de valores correspondientes a la sequía habitual en régimen alterado (serie anual de $Q_{95\%}$).

$CV(Sh)_n$ = coeficiente de variación de la serie anual de valores correspondientes a la sequía habitual en régimen natural (serie anual de $Q_{95\%}$).

IAH 19: ÍNDICE DE DURACIÓN DE LAS SEQUÍAS

Objetivo: comprobar si en régimen alterado los períodos de sequías mantienen una duración análoga a los del régimen natural.

Expresión: el parámetro propuesto para caracterizar la duración de las sequías ha sido definido en epígrafes anteriores como el máximo número de días consecutivos en que no se alcanza el umbral definido por el valor $Q_{95\%}$. Por consiguiente, la alteración en la duración de sequías se evalúa como cociente entre el valor de este parámetro en régimen alterado y su homólogo en natural.

$$IAH 19 = \frac{(\text{Máximo nº de días consecutivos con } Q < Q_{95\%})_a}{(\text{Máximo nº de días consecutivos con } Q < Q_{95\%})_n}$$

$(\text{Máximo nº de días consecutivos con } Q < Q_{95\%})_a$ = Máximo número de días consecutivos, en valor medio, en el régimen alterado, en que no se supera la sequía habitual natural.

$(\text{Máximo nº de días consecutivos con } Q < Q_{95\%})_n$ = Máximo número de días consecutivos, en valor medio, en el régimen natural, en que se no se supera la sequía habitual natural.

IAH 20: ÍNDICE DE NÚMERO DE DÍAS CON CAUDAL NULO

Objetivo: evaluar la alteración en el número de días con caudal nulo característico del régimen natural.

Procedimiento: El procedimiento se centra en evaluar la afección a la duración de los períodos de caudal nulo para cada mes del año y calcular posteriormente el índice de alteración como el promedio de estos índices mensuales.

El índice mensual $IAH 20^{mes i}$ se obtiene siguiendo la lógica siguiente:

- Si $ABS(\text{natural}-\text{alterado}) > 5 \rightarrow IAH_{20}^{\text{mes } i} = 0$
- Si $ABS(\text{natural}-\text{alterado}) \leq 5 \rightarrow IAH_{20}^{\text{mes } i} = \frac{5 - ABS(\text{NATURAL} - \text{ALTERADO})}{5}$

donde

ABS: valor absoluto

NATURAL: nº medio de días al mes con $Q=0$ en régimen natural para el mes considerado

ALTERADO: nº medio de días al mes con $Q=0$ en régimen alterado para el mes considerado

Al final se ofrece un índice final **IAH 20** obtenido como media de los doce valores mensuales

IAH 21: ÍNDICE DE DURACIÓN DE LAS SEQUÍAS

Objetivo: se propone este índice con el objetivo de evaluar la alteración en el aspecto de estacionalidad de las sequías.

Expresión: al igual que en anteriores ocasiones se elige como caudal de referencia para discriminar la presencia o no de una SEQUÍA en un mes determinado el correspondiente al $Q_{95\%}$ en régimen natural.

El procedimiento se centra en evaluar la afección a la estacionalidad de las sequías para cada mes del año y calcular posteriormente el índice de alteración como el promedio de estos índices mensuales.

El índice mensual $IAH_{21}^{\text{mes } i}$ se obtiene siguiendo la lógica siguiente:

- Si $ABS(\text{natural}-\text{alterado}) > 5 \rightarrow IAH_{21}^{\text{mes } i} = 0$
- Si $ABS(\text{natural}-\text{alterado}) \leq 5 \rightarrow IAH_{21}^{\text{mes } i} = \frac{5 - ABS(\text{NATURAL} - \text{ALTERADO})}{5}$

donde

ABS: valor absoluto

NATURAL: nº medio de días al mes con $Q < Q_{95\%}$ en régimen natural para el mes considerado 5%

ALTERADO: nº medio de días al mes con $Q < Q_{95\%}$ en régimen alterado para el mes considerado 5%

Al final se ofrece un índice final **IAH 21** obtenido como media de los doce valores mensuales



F ÍNDICES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA EN REGÍMENES NO COETÁNEOS: DEFINICIONES

F.1 ÍNDICES DE ALTERACIÓN EN VALORES HABITUALES

En situación de no coetaneidad (<15 años comunes entre las series natural y alterada) la evaluación de la alteración en valores habituales se llevará a cabo según unos índices específicamente definidos para este caso. Sin embargo, la evaluación de la alteración en valores extremos, -avenidas y sequías-, al no exigir la condición de coetaneidad podrá realizarse mediante los índices **IAH 7- IAH 21** ya definidos para regímenes coetáneos.

La **Tabla nº 12** recoge los 25 índices que permiten evaluar la alteración en situación de no coetaneidad.

Tabla nº 12: RELACIÓN DE ÍNDICES DE ALTERACIÓN PARA REGÍMENES NO COETÁNEOS

ASPECTO		CODIGO	DENOMINACIÓN	Parámetro del que proviene
VALORES HABITUALES	MAGNITUD	M1	Magnitud de las aportaciones anuales	H1
		M2	Magnitud de las aportaciones mensuales	H4
		M3	Magnitud de las aportaciones de cada mes: 12 valores	H4
	VARIABILIDAD	V1	Variabilidad de las aportaciones anuales	H3
		V2	Variabilidad de las aportaciones mensuales	H6
		V3	Variabilidad de las aportaciones de cada mes: 12 valores	H6
		V4	Variabilidad extrema	H7
	ESTACIONALIDAD	IAH 3	variabilidad habitual	P4
		E1	Estacionalidad de máximos	H8
		E2	Estacionalidad de mínimos	H9
AVENIDAS	MAGNITUD Y FRECUENCIA	IAH 7	Magnitud de las avenidas máximas	P5
		IAH 8	Magnitud del Caudal Generador del Lecho	P6
		IAH 9	Magnitud del Caudal de conectividad	P7
		IAH 10	Magnitud de las avenidas habituales	P8
	VARIABILIDAD	IAH 11	Variabilidad de las avenidas máximas	P9
		IAH 12	Variabilidad de las avenidas habituales	P10
	DURACION	IAH 13	Duración de avenidas	P11
ESTACIONALIDAD	IAH 14	Estacionalidad de avenidas (12 valores, uno para cada mes)	P12	
SEQUIÁS	MAGNITUD Y FRECUENCIA	IAH 15	Magnitud de las sequías extremas	P13
		IAH 16	Magnitud de las sequías habituales	P14
	VARIABILIDAD	IAH 17	Variabilidad de las sequías extremas	P15
		IAH 18	Variabilidad de las sequías habituales	P16
	DURACION	IAH 19	Duración de sequías	P17
		IAH 20	Nº de días con caudal nulo (12 valores, uno para cada mes)	P18
	ESTACIONALIDAD	IAH 21	Estacionalidad de sequías (12 valores, uno para cada mes)	P19

25 ÍNDICES

Índices similares a los ya definidos para series coetáneas

Índice especificado a nivel mensual, como resumen se ofrece la media anual

A continuación se especifica el procedimiento de cálculo de los índices de nueva definición.



M1: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS APORTACIONES ANUALES

Objetivo: evaluar la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la magnitud de las aportaciones anuales respecto a su valor en régimen natural

Expresión:

$$M_1 = \frac{\overline{AA}_a}{\overline{AA}_n}$$

donde:

\overline{AA}_a = Aportación media anual en régimen alterado.

\overline{AA}_n = Aportación media anual en régimen natural

M 2: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS APORTACIONES MENSUALES

Objetivo: Con el objetivo de evitar las compensaciones que se pueden producir entre los distintos meses del año cuando se trabaja con valores anuales, se propone este segundo índice que mitiga lo anterior al dotar del mismo peso a la alteración habida cada mes.

Expresión: La evaluación de la alteración se realizará por tanto mes a mes, para cada mes de cada año. El índice se expresará finalmente como el valor medio de todas las alteraciones mensuales estimadas.

$$M_2 = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \frac{\overline{(Am\ mes\ i)}_a}{\overline{(Am\ mes\ i)}_n}$$

donde:

$\overline{(Am\ mes\ i)}_a$ = Aportación mensual media del mes i en régimen alterado

$\overline{(Am\ mes\ i)}_n$ = Aportación mensual media del mes i en régimen natural

M 3 mes i: ÍNDICE DE MAGNITUD DE LAS APORTACIONES DE CADA MES

Expresión: La evaluación de la alteración se realizará de modo independiente para cada mes, ofreciéndose los 12 índices mensuales.

$$M_{3\ mes\ i} = \frac{\overline{(Am\ mes\ i)}_a}{\overline{(Am\ mes\ i)}_n}$$

donde:

$\overline{(Am\ mes\ i)}_a$ = Aportación mensual media del mes i en régimen alterado

$\overline{(Am\ mes\ i)}_n$ = Aportación mensual media del mes i en régimen natural

V1: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS APORTACIONES ANUALES

Objetivo: evaluar la alteración en la variabilidad a nivel de aportación anual

Expresión:

$$V_1 = \frac{CV(AA)_a}{CV(AA)_n}$$

donde:

CV (AA) a= coeficiente de variación de la serie de aportaciones anuales en régimen alterado.

CV (AA) n= coeficiente de variación de la serie de aportaciones anuales en régimen natural.

V2: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS APORTACIONES MENSUALES

Objetivo: evaluar la alteración en la variabilidad a nivel de aportación mensual



Expresión:

$$V 2 = \frac{1}{12} \frac{\sum_{i=1}^{12} CV (Am \text{ mes } i) a}{CV (mes i) n}$$

donde:

CV (mes i) a = coeficiente de variación de la serie de aportaciones mensuales del mes i en régimen alterado.

CV (mes i) n = coeficiente de variación de la serie de aportaciones mensuales del mes i en régimen natural.

V 3 mes i: ÍNDICE DE VARIABILIDAD DE LAS APORTACIONES DE CADA MES

Expresión: La evaluación de la alteración se realizará de modo independiente para cada mes, ofreciéndose los 12 índices mensuales.

$$V 3_{\text{mes } i} = \frac{CV (mes i) a}{CV (mes i) n}$$

donde:

CV (mes i) a = Coeficiente de variación de la serie de aportaciones del mes i en régimen alterado

CV (mes i) n = Coeficiente de variación de la serie de aportaciones del mes i en régimen natural

V 4: ÍNDICE DE VARIABILIDAD EXTREMA

Objetivo: evaluar la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la variabilidad extrema de los valores habituales respecto al régimen natural.

Expresión:

$$V 4 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Am \text{ máxima} - Am \text{ mínima}) \text{ año } i, a}{\frac{1}{M} \sum_{p=1}^M (Am \text{ máxima} - Am \text{ mínima}) \text{ año } p, n}$$

Am máxima, año i, a = Aportación mensual máxima del año i en régimen alterado. Análogamente para Am mínima año i, a.

Am máxima, año i, n = Aportación mensual máxima del año p en régimen natural. Análogamente para Am mínima, año p, n.

N= no de años disponibles en régimen alterado

M= nº de años disponibles en régimen natural

E1: INDICE DE ESTACIONALIDAD DE MÁXIMOS

Objetivo: evaluar la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la estacionalidad de las aportaciones mensuales máximas naturales.

Expresión: construida la tabla de frecuencias relativas de la presencia de máximos en cada mes (ver parámetro **H8** en epígrafe **C.1.2.**), la alteración en la estacionalidad de los máximos, se estimará como el desfase existente (medido en nº de meses) entre el mes con máxima frecuencia en régimen alterado y el mes con máxima frecuencia en régimen natural. En el caso de que el carácter de máximo sea común a varios meses (es decir, que varios meses tengan el máximo valor de frecuencia relativa), se seleccionará como máximo el primer mes en sentido cronológico (octubre- septiembre). Fijados estos máximos en cada régimen se procede del modo siguiente:

- Ubicados en el mes de máxima frecuencia en régimen natural, se determina el número de meses (**x** meses) que anteceden cronológicamente hasta alcanzar el mes más alejado donde se localiza la máxima frecuencia en alterado.
- Ubicados en el mes de máxima frecuencia en régimen natural, se determina cuantos meses faltan (**y** meses) para llegar al primer mes de máxima frecuencia en alterado.

- El número de meses de desfase vendrá dado por el mayor de los valores x e y obtenidos anteriormente, no admitiéndose nunca desfases superiores a 6 meses.

El valor final del índice se obtiene como:

$$E1 = 1 - \frac{1}{6} (\text{n}^\circ \text{ meses de desfase})$$

Comentario: La **Tabla n° 19** establece las correspondencias existentes entre valor obtenido al calcular **E1** y el número de meses de desfase existente entre ambos regímenes

Interpretación	
Valor de E1	Desfase
0	6 meses
0,17	5 meses
0,33	4 meses
0,5	3 meses
0,67	2 meses
0,83	1 mes
1	Sin desfase

Tabla n° 19- Interpretación de los resultados de los índices de estacionalidad

E2: INDICE DE ESTACIONALIDAD DE MÍNIMOS

Objetivo: evaluar la distorsión ocasionada por el régimen circulante sobre la estacionalidad de las aportaciones mensuales mínimas naturales.

Expresión: construida la tabla de frecuencias relativas de la presencia de mínimos en cada mes (ver parámetro **H9** en epigrafe **C.1.2.**), la alteración en la estacionalidad de los mínimos, se estimará como el desfase existente (medido en n° de meses) entre el mes con máxima frecuencia en régimen alterado y el mes con máxima frecuencia en régimen alterado. En el caso de que el carácter de máximo sea común a varios meses (es decir, que varios meses tengan el máximo valor de frecuencia relativa), se seleccionará como máximo el primer mes en sentido cronológico (octubre- septiembre). Fijados estos máximos en cada régimen se procede del modo siguiente:



- Ubicados en el mes de máxima frecuencia en régimen natural, se determina el número de meses (x meses) que anteceden cronológicamente hasta alcanzar el mes más alejado donde se localiza la máxima frecuencia en alterado.
- Ubicados en el mes de máxima frecuencia en régimen natural, se determina cuantos meses faltan (y meses) para llegar al mes más alejado de máxima frecuencia en alterado.
- El número de meses de desfase vendrá dado por el mayor de los valores x e y obtenidos anteriormente, no admitiéndose valores de desfase superiores a 6 meses.

El valor final del índice se obtiene como:

$$E2 = 1 - \frac{1}{6} (\text{n}^\circ \text{ meses de desfase})$$

F.2 CÁLCULO DEL INDICE DE ALTERACIÓN GLOBAL EN VALORES HABITUALES

- El índice de alteración Global de valores habituales en situación de no coetaneidad (**IAG H**) se calculará considerando los siguientes índices de alteración parciales: **M1, M2, V1, V4, E1, y E2**

REFERENCIAS

- ANDREWS, E.D., 1984. Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado. *Bulletin of the Geological Society of America* 95, 371-8.
- ARTHINGTON A.H., 2002. Environmental flows: ecological importance, methods and lessons from Australia. Mekong Dialogue Workshop. International transfer of river basin development experience: Australia and the Mekong Region, 2 September 2002.
- ARTHINGTON A.H., 1997. Wounded Rivers, Thirsty Land: Getting Water Management Right. Inaugural Professorial Lecture, Griffith University, Queensland.
- BAEZA D., MARTÍNEZ-CAPEL F. Y GARCÍA DE JALÓN D., 2003. Variabilidad temporal de caudales: aplicación a la gestión de ríos regulados. *Ingeniería del Agua* Vol. 10 N°4 469-479.
- BAKER D.B, RICHARDS R.P., LOFTUS T.T. Y KRAMER J.W., 2004. A new flashiness index: characteristics and applications to midwestern rivers and streams. *Journal Of The American Water Resources Association* pp: 503-523.
- BALES J.D. Y POPE B.F., 2001. Identification of changes in streamflow characteristics. *Journal of the American Water Resources Association*. February 2001, Vol. 37, NO.1
- BATALLA R.J., GÓMEZ C.M., KONDOLF G.M., 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology* 290 (2004)117-136.
- BRIZGA S., ARTHINGTON A., 2001. Guidelines for Environmental Flow Management for Queensland Rivers. Centre for Catchment and In-Stream Research, Griffith University and Department of Natural Resources and Mines, Queensland.
- BRIZGA S., ARTHINGTON A., CHOY S., CRAIGIE N., MACKAY S., POPLAWSKI W., PUSEY B. Y WERREN G., 2001. Environmental Flow Report: Pioneer Valley. Water Resource Plan. Natural Resources and Mines. Queensland Government.
- BUNN S.E. Y ARTHINGTON A., 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* Vol. 30, no. 4, pp. 492-507.
- CASTRO J.M. Y JACKSON P.L., 2001. Bankfull discharge recurrence intervals and regional hydraulic geometry relationships: patterns in the Pacific Northwest, USA, *Journal of American Water Resources Association* 37(5), 1249-1262.
- CIS-WFD, EUROPEAN COMMON IMPLEMENTATION STRATEGY (CIS) FOR THE WATER FRAMEWORK DIRECTIVE, 2003. Guidance on establishing reference conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters. Working Group 2.3, REFCOND Guidance. <http://forum.europa.eu.int/comm/Public/irc/env/wdf/library> [Consulta 10/09/04]
- CLAUSEN B. Y BIGGS B.J.F., 2000. Flow variables for ecological studies in temperate streams: groupings based on covariance. *Journal of Hydrology* 231(2000)184-197.
- COBO F., 2000. Ecología Fluvial y Caudales ecológicos. "Jornadas sobre los ríos gallegos". Federación Ecologista Gallega. Facultad de Biología de la Universidad de Santiago. 29-30 abril 2000.
- COLLIER K.J. Y SACRSBROOK M.K., 2000. Use of riparian and hyporheic habitats. EN *New Zealand Stream Invertebrates: ecology and implications for management*. Collier K.J. y Winterborn M.J. New Zealand Limnological Society. NIWA.
- COLLIER M.P., WEBB R.H. Y ANDREWS E.D., 1997. Experimental flooding in the Gran Canyon. *Scientific American* 276:82-89.
- DAKOVA S., UZUNOV Y. Y MANDADJIEV D., 2000. Low flow – the river's ecosystem limiting factor. *Ecological Engineering* 16(2000) 167-174.
- DIETERLE J., COX O., HECK C. Y STEINBACHER K., 2003. Stream Restoration: Natural Flow Regimes and Interactions with Ecological Processes. <http://www.cnr.colostate.edu> [Consulta 1/05/04]
- FERNÁNDEZ YUSTE J.A., 2003. Régimen ambiental de caudales y morfología fluvial. Curso sobre Régimen Ambiental de Caudales. Universidad Internacional Menéndez Pelayo. 29 de septiembre a 3 de octubre de 2003. Cuenca.
- FREDRICKSON L H., 1997. Managing Forestal wetlands. Pages 147-177 in M.S. Boyce y Haney A. (eds.). *Ecosystem management, applications for sustainable forest and wildlife resources*. Yale University Press, New Haven.
- GIPPEL C.J., 1995. Environmental hydraulics of large wood debris in streams and rivers. *Journal of Environmental Engineering* 121: 388-395.
- GONZÁLEZ DEL TÁNAGO DEL RÍO M. Y GARCÍA DE JALÓN LASTRA D., 1995. Restauración de ríos y riberas. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- GONÇALVES MOREIRA DE JESUS, M.T., 2002. Impacto de centrais mini-hídricas na qualidade biológica da água: a "Cascata"do Alva (Portugal). III Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del agua." *La Directiva Marco del Agua: realidades y futuros*". Sevilla, 13 a 17 de noviembre de 2003.
- GROWNS J. Y MARSH N., 2000: Characterisation of Flow in Regulated and Unregulated Streams in Eastern Australia. Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology. Technical Report 3/2000.
- GUPTA, P.N., 1998. The necessity of environmentally sustainable dams projects for the 21st century. Workshop on financing and private sector participation in water resources projects. 66th ICOLD annual Meeting, 1-7 November, 1998, New Delhi, India.
- HAINES A.T., FINLAYSON B.L. Y McMAHON T.A., 1988. A global classification of river regimes. *Applied Geography* 8:255-72.
- HAWKES C.L., MILLER D.L. Y LAYHER W.G., 1986. Fish ecoregions of Kansas: stream fish assemblage patterns and associated environmental correlates. *Environmental Biology of Fishes* 17: 269-279.

- HEY R. D. Y THORNE C.R., 1986. Stable Channels with mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112: 671-689.
- HICKEY J.T. Y SALAS J.D., 1995. Environmental effects of extreme floods. U.S. -Italy Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts and Management of Extreme Floods. Perugia (Italy), November, 1995.
- HILL M.T., PLATTS W.S., BESCHTA R.L., 1991. Ecological and geomorphological concepts for instream and out-of channel flow requirements. *Rivers*. 2 (3): 198-210.
- HUGHES J.M.R. Y JAMES B., 1989. A hydrological regionalization of streams in Victoria, Australia with implication for stream ecology. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 40: 303-326
- JOWETT I., 2000. New Zealand Stream Invertebrates: Ecology and Implications for Management: Flow management. Ed. K. J. Collier y M.J. Winterbourn. New Zealand Limnological Society. NIWA.
- KING J., THARME R. Y BROWN C., 1999. Definition and implementation of Instream Flows. Contributing Paper. World Commission on Dams. Thematic Report, Final Report, September 1999.
- KNIGHTON D., 1998. Fluvial Forms and Processes. a new perspective. .Arnold, London.
- KOZŁOWSKI T. T., editor, 1984. Flooding and plant growth. Academic Press, San Diego, California. (en Richter y Richter 2000)
- LYTLE D.A. Y POFF N.L., 2004. Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology and Evolution*. Vol. 19. No.2 February 2004.
- MAGDALENO MAS, F., 2005. Caudales ecológicos: conceptos, métodos e nuevas interpretaciones. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX. Ministerio de Fomento.
- MAHMOOD K., TARAR R.N. Y MASOOD T., 1979. Hydraulic geometry relations for ACOP channels. Washington DC: Civil, Mechanical and Environmental Engineering Department, George Washington University.
- MAINGI J.K. Y MARSH S.E., 2002. Quantifying hydrologic impacts following dam construction along the Tana River, Kenya. *Journal of Arid Environments* (2002) 50: 53-79.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA A. Y SANZ RONDA F.J., 2003. Determinación de caudales de mantenimiento en ríos de la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Curso Régimen Ambiental de Caudales. Universidad Internacional Menéndez Pelayo, Cuenca. 29 de septiembre a 3 de octubre de 2003.
- 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 de las Aguas.
- MOLLES M.C., CRAWFORD C.S. Y ELLIS L.M., 1995. Effects of an experimental flood on litter dynamics in the Middle Rio Grande riparian ecosystem. *Regulated Rivers: Research & Management* 11:275-281
- MOSS D.M., FURSE T., WRIGHT J.F. Y ARMITAGE P.D., 1987: The prediction of the macro-invertebrate fauna of unpolluted running-water sites in Great Britain using environmental data. *Freshwater Biology* 33: 141-160.
- NAIMAN R.J., BUNN S.E., NILSSON C., PETTS G.E., PINAY 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 C., Y SVEDMARK M., 2002. Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: riparian plant communities. *Environmental Management* Vol. 30, No. 4, pp. 468-480.
- OLDEN J.D. Y POFF N.L., 2003. Redundancy and the choice of Hydrologic Indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications* 19: 101-121.
- PALAU A, 1998. El caudal básico. Método para la gestión hidrobiológica de ríos regulados. Informe Técnico para CEDEX. Madrid.
- PARKER G., 1979. Hydraulic geometry of active gravel rivers. *Journal of the Hydraulic Division American Society of Civil Engineers*:105, HY9, 1185-201.
- PINAY G., CLÉMENT J.C. Y NAIMAN R.J., 2002. Basic Principles and Ecological Consequences of Changing Water Regimes on Nitrogen Cycling in Fluvial Systems. *Environmental Management* Vol.30, No.4, pp. 481-491.
- 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. Y ALLAN D.J., 1995. Funcional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability. *Ecology* 76:606-627 (en Naiman *et al.* 2002)
- PUCKRIDGE J.T., SHELDON F., WALKER K.F. Y BOULTON A.J., 1998. Flow variability and the ecology of large rivers. *Marine and Freshwater Research* 49: 55-72.
- RICHARDS R.P., 1990. Measures of flow variability and new flow-based classification of Great Lakes tributaries. *Journal of Great Lakes Research* 16: 53-70.
- RICHTER B.D. Y RICHTER H.E., 2000. Prescribing Flood Regimes to Sustain Riparian Ecosystems along Meandering Rivers. *Conservation Biology*, pages1467-1478. Volume 14, No.5, October 2000.
- RICHTER B.D., BAUMGARTNER J.V., BRAUN D.P. Y POWELL J., 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management* 14: 329-340 (1998)

RICHTER B.D., BAUMGARTNER J.V., WIGINGTON R. Y BRAUN D.P., 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology* 37: 231-249.

http://waterdata.usgs.gov/or/nwis/uv?dd_cd=01&format=gif&period=7&site_no=14207770.
[Consulta 12 noviembre 2004]

RICHTER B.D., BAUMGARTNER J.V., POWELL J. Y BRAUN D.P., 1995. A method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conserv. Biol.* 10 (4), 1163-1174. http://www.roanokeriver.com/flow/TNC%20case%20study_iha_meth.pdf. [Consulta 14 mayo 2004]

ROBERTSON L., 1997. Water operations on the Pecos River, New Mexico and the Pecos bluntnose shiner, a federally-listed minnow. US Conference on Irrigation and Drainage Symposium.

ROOD S B. , MAHONEY J. M. , REID D. E. , Y ZILM L., 1995. Instream flows and the decline of riparian cottonwoods along the St. Mary River, Albert. *Canadian Journal of Botany* 73:1250-1260

RULIFSON R. A . Y MANOOCH C.S. III, eds, 1993. Roanake River water flow committee report for 1991-1993. Albermale-Pamlico estuarine study. Raleigh (NC): US Environmental Protection Agency. Project nr APES 93-18

SAVENIJE H.H.G., 2003. The width of a bankfull channel; Lacey´s formula explained. *Journal of Hydrology* 276 (2003) 176-183.

SEDIMENTATION COMMITTEE, 1992. ASCE Task Committee on Sediment Transport and Aquatic Habitats, Sediment and Aquatic Habitat in River Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.118, No. 5, May 1992

SCHMITD L.J. Y 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.

STEINBACHER K., 2003. The Alteration of Natural Flow Regimes Caused by Dams and the Effects on Habitat Heterogeneity. En Stream Restoration: Natural Flow Regimes and Interactions with Ecological Processes. www.cnr.colostate.edu

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.

SUGIYAMA H., VUDHIVANICH V., WHITAKER C. Y LORSIRIRAT K., 2003. Stochastic Flow Duration Curves for evaluation of Flow Regimes in Rivers. *Journal of the American Water Resources Association*. February 2003: 47-59.

THOMS M.C. Y SHELDON F., 2002. An ecosystem approach for determinig environmental water allocations in Australian dryland river systems: the role of geomorphology. *Geomorphology* 47 (2002) 153-168.

TRUSH W.J., McBAIN S.M. Y LEOPOLD L.B., 2000. Attributes of an alluvial river and their relation to water policy and management. *Proceedings of the National Academy of Science*. 97 (22): 11858-11863.

USGS, 2004

ANEJO I

CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD INTERANUAL E INTRANUAL

VARIABILIDAD INTERANUAL: PROCEDIMIENTO

La caracterización de la variabilidad interanual es una fase previa imprescindible en el estudio de los valores habituales del régimen de caudales. Esta caracterización tiene por objetivo discriminar los umbrales de aportación que permitan clasificar los años en tres tipos, denominados tipo húmedo, tipo medio y tipo seco.

El procedimiento propuesto se apoya en un análisis de los percentiles de excedencia de la serie de aportaciones anuales en régimen natural:

ESTIMACIÓN DE PERCENTILES DE EXCEDENCIA

Variable: aportación anual
Datos: serie de valores correspondientes a las aportaciones anuales de los n años disponibles.
Estimadores: Percentil de excedencia del valor $X = 1 - \text{fra}(X)$
 $\text{fra}(X) = m / (n+1)$

Donde:

fra = frecuencia relativa acumulada correspondiente a la aportación anual X (= probabilidad de que la variable tome un valor menor o igual a X) obtenida por la expresión de Weibull
m = posición que ocupa ese valor X en la serie ordenada de menor a mayor
n = número total de datos en la serie

Para establecer los umbrales de aportación que permitan discriminar los años "húmedos", "medios" y "secos" se consideran las aportaciones correspondientes a los percentiles de excedencia del 25% y 75% (**Figura n° AI.1**):

CRITERIO PARA LA ASIGNACIÓN DEL "TIPO" DE AÑO

- ✚ Un año será considerado **HÚMEDO** si su aportación anual en Régimen Natural es superior a la aportación correspondiente al percentil de excedencia del 25%
- ✚ Un año será considerado **MEDIO** si su aportación anual en Régimen Natural está comprendida entre las aportaciones correspondientes a los percentiles de excedencia de 25% y 75%
- ✚ Un año será considerado **SECO** si su aportación anual en Régimen Natural es inferior a la aportación correspondiente al percentil de excedencia del 75%

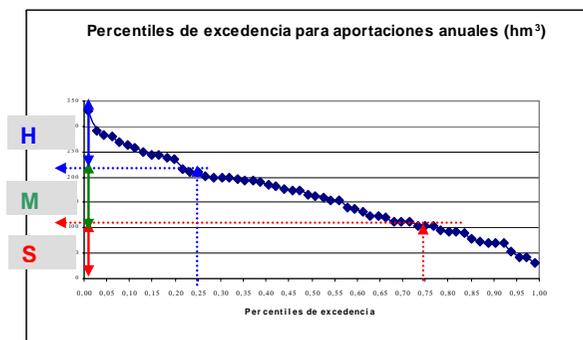


Figura n° AI.1.- Discriminación del tipo de año, húmedo **H**, medio **M** o seco **S** en base a la curva de percentiles de excedencia de las aportaciones anuales (hm^3)

De este modo aceptando la muestra como representativa del comportamiento de la variable "aportaciones anuales", en cualquier otra muestra los años "medios" aparecerán, como promedio, en el 50% de los casos, mientras que los "húmedos" y "secos" tendrán una presencia media del 25% respectivamente.

VARIABILIDAD INTRANUAL: DETERMINACIÓN DE LAS APORTACIONES MENSUALES PARA CADA TIPO DE AÑO

El objetivo de la caracterización de la variabilidad intranual es obtener los valores representativos de las aportaciones mensuales para cada tipo de año.

En principio, esta representatividad podría asumirse con la media mensual, pero la presencia de sesgos apreciables en la variable (aportación mensual) hace más recomendable el empleo de la mediana (Growth y Marsh, 2000).

El resultado de este proceso permite caracterizar la variabilidad intranual en los tres "tipos" de año (**Figura n° AI.2**)

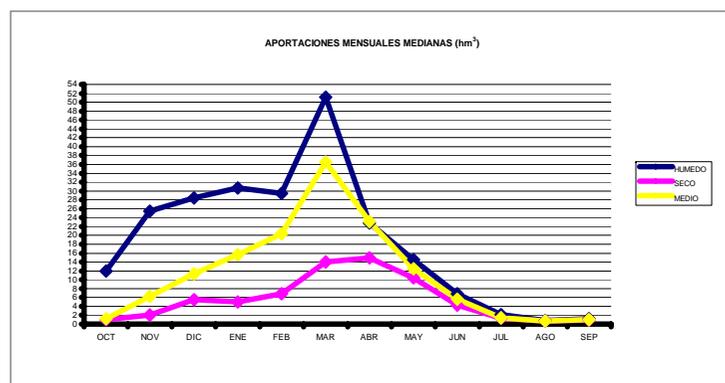


Figura n° AI.2.- Aportaciones medianas mensuales para los "tipos" de año considerados.

Antes de dar los resultados así obtenidos como definitivos es necesario analizar la significación de las aportaciones medianas mensuales obtenidas, con el objetivo de comprobar si la segregación en años "húmedos", "medios" y "secos" que se ha realizado en función de la aportación anual discrimina bien las aportaciones mensuales, o si por el contrario, para un mes determinado no se observan diferencias significativas en las medianas correspondientes a los tres tipos de año considerados (como ocurre por ejemplo en la **Figura n° AI. 2** con el mes de octubre para "medio y "seco", o con el mes de abril para "húmedo y "medio").

El proceso seguido puede esquematizarse del modo siguiente:

- I. Para cada uno de los meses se construyen tres series de datos, correspondientes a las aportaciones mensuales de los años "húmedos", "medios" y "secos". Sobre las tres series correspondientes a cada mes se aplica el test de Kruskal-Wallis (SPSS 11.5), para aceptar o rechazar la hipótesis de que las medianas de las tres series del mes en estudio no tienen diferencias significativas.
- II. Supongamos que en un mes, el mes *i*, el test permite aceptar que no hay diferencias significativas en las medianas de las aportaciones mensuales correspondientes a los tres "tipos". Ese resultado implica que la segregación en años "húmedos", "medios" y "secos" que se obtuvo con el análisis de las aportaciones anuales, no es significativa para el mes *i*. Este resultado es muy posible que se presente; pongamos, por ejemplo, en el mes de agosto. En general la aportación de ese mes respecto a la anual será poco significativa, por lo que prácticamente no influirá en que un año sea húmedo, medio o seco; en otras palabras, podría presentarse un mes de agosto muy seco en el contexto de un año globalmente húmedo, o un agosto singularmente caudaloso en un año al que globalmente correspondiese la condición de seco; no es pues descartable que los registros del mes de agosto correspondientes a años húmedos no presenten diferencias significativas con los de años medios y con los de secos. Por tanto, cuando se acepta la hipótesis de que entre las medianas no hay diferencias significativas, se asume que para caracterizar la aportación del mes *i* en cada tipo (húmedo, medio y seco) es necesario prescindir de la discriminación establecida con las aportaciones anuales y debe establecerse un nuevo criterio que resulte adecuado para el mes en cuestión. Para generar esa nueva discriminación se procede como se indica a continuación:

CRITERIO PARA CARACTERIZAR LA APORTACIÓN CORRESPONDIENTE A UN MES CUANDO NO HAY DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN LAS MEDIANAS DE LAS APORTACIONES MENSUALES DEL MES i CORRESPONDIENTES A LOS AÑOS HÚMEDOS, MEDIOS Y SECOS.

Variable: aportación mensual (mes i)

Datos: serie de valores correspondientes a las aportaciones mensuales (mes i) de los **n** años disponibles.

Estimadores: Percentil de excedencia del valor $X = 1 - \text{fra}(X)$
 $\text{fra}(X) = m / (n+1)$

Donde:

- fra** = frecuencia relativa acumulada correspondiente a la aportación anual X (= probabilidad de que la variable tome un valor menor o igual a X) obtenida por la expresión de Weibull
- m** = posición que ocupa ese valor X en la serie ordenada de menor a mayor
- n** = número total de datos en la serie

La aportación del **mes i de un año HÚMEDO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de datos cuyos **percentiles de excedencia sean inferiores al 25%**.

La aportación del **mes i de un año SECO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de datos cuyos **percentiles de excedencia sean superiores al 75%**.

La aportación del **mes i de un año MEDIO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de datos cuyos **percentiles de excedencia estén comprendidos entre el 25 y el 75%**.

III. En aquellos meses en los que el test de Kruskal-Wallis (SPSS 11.5) permite aceptar que hay diferencias significativas al menos entre dos de estos tres grupos (**Húmedo, Medio, Seco**), se procede a localizar estas diferencias contrastando dos a dos los grupos más próximos, esto es **Húmedo-Medio** y **Medio-Seco**.

Las distintas posibilidades de este doble análisis y sus correspondientes resoluciones son las siguientes:

III.1. En el mes i:

- Las series **H-M no tienen** diferencias significativas
- Las series **M-S no tienen** diferencias significativas

Por tanto sólo existen diferencias entre las series más extremas Húmedo-Seco, pero no es posible aceptar esa discriminación porque la serie Media no quedaría adecuadamente segregada, pues sus valores podrían entrar tanto en la serie húmeda como en la seca. Para esta situación, se propone agrupar las tres series **H-M-S** y desarrollar para su caracterización un protocolo idéntico al expuesto para el caso II.

CRITERIO PARA CARACTERIZAR LA APORTACIÓN CORRESPONDIENTE A UN MES CUANDO NO HAY DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN LAS MEDIANAS DE LAS APORTACIONES MENSUALES DEL MES i CORRESPONDIENTES A LOS AÑOS HÚMEDOS, MEDIOS Y SECOS.

Variable: aportación mensual (mes i)

Datos: serie de valores correspondientes a las aportaciones mensuales (mes i) de los **n** años disponibles.

Estimadores: Percentil de excedencia del valor $X = 1 - \text{fra}(X)$
 $\text{fra}(X) = m / (n+1)$

Donde:

- fra** = frecuencia relativa acumulada correspondiente a la aportación anual X (= probabilidad de que la variable tome un valor menor o igual a X) obtenida por la expresión de Weibull
- m** = posición que ocupa ese valor X en la serie ordenada de menor a mayor
- n** = número total de datos en la serie

La aportación del **mes i de un año HÚMEDO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de datos cuyos **percentiles de excedencia sean inferiores al 25%**.

La aportación del **mes i de un año SECO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de datos cuyos **percentiles de excedencia sean superiores al 75%**.

La aportación del **mes i de un año MEDIO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de datos cuyos **percentiles de excedencia estén comprendidos entre el 25 y el 75%**.

III.2. En el mes i:

- Las series **H-M tienen** diferencias significativas
- Las series **M-S tienen** diferencias significativas

En este caso, la discriminación derivada de la consideración de las aportaciones anuales es válida para la caracterización de las aportaciones mensuales, por lo que el mes i de un año húmedo, medio o seco queda caracterizado por la mediana de las aportaciones de ese mes en los años húmedos, medios o secos respectivamente:

CRITERIO PARA CARACTERIZAR LA APORTACIÓN CORRESPONDIENTE A UN MES CUANDO LAS MEDIANAS DE LAS APORTACIONES MENSUALES DEL MES i CORRESPONDIENTES A LOS AÑOS HÚMEDOS, MEDIOS Y SECOS PRESENTAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS.

Variable: aportación mensual (mes i)
Datos: tres series de valores correspondientes a las aportaciones mensuales (mes i) de los años húmedos, medios y secos, respectivamente.
Estimador: mediana de cada serie

La aportación del **mes i de un año HÚMEDO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de aportaciones del mes i en años húmedos.

La aportación del **mes i de un año SECO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de aportaciones del mes i en años secos.

La aportación del **mes i de un año MEDIO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de aportaciones del mes i en años medios.

III.3. En el mes i:

- Las series **H-M tienen** diferencias significativas
- Las series **M-S no tienen** diferencias significativas

En este caso la caracterización de año húmedo según la aportación anual es válida también para la caracterización mensual, pero no lo son las correspondientes a años medios y secos. Se procede como se recoge a continuación:

CRITERIO PARA CARACTERIZAR LA APORTACIÓN CORRESPONDIENTE A UN MES CUANDO HAY DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN LAS MEDIANAS DE LAS APORTACIONES MENSUALES DEL MES i CORRESPONDIENTES A LOS AÑOS HÚMEDOS Y MEDIOS.

A) PARA MES TIPO HÚMEDO

Variable: aportación mensual (mes i)
Datos: serie de valores correspondientes a las aportaciones mensuales (mes i) de los años HÚMEDOS.
Estimador: mediana de la serie

La aportación del **mes i de un año HÚMEDO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de de aportaciones del mes i en años húmedos.

B) PARA MES TIPO MEDIO Y SECO

Variable: aportación mensual (mes i)
Datos: serie de valores correspondientes a las aportaciones mensuales (mes i) de los años MEDIOS y SECOS. (Esta serie estará formada, aproximadamente, por el 75% del total de n años, ya que el 25% restante es el que sirvió para caracterizar la aportación mensual en años húmedos).

Estimadores: Percentil de excedencia del valor $X = 1 - \text{fra}(X)$
 $\text{fra}(X) = m / (p+1)$

Donde:

fra = frecuencia relativa acumulada correspondiente a la aportación anual X (= probabilidad de que la variable tome un valor menor o igual a X) obtenida por la expresión de Weibull

m = posición que ocupa ese valor X en la serie ordenada de menor a mayor
p = número total de datos en la serie

La aportación del **mes i de un año MEDIO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de de datos cuyos **percentiles de excedencia sean inferiores al 66%**. (De esta manera se asegura que el número de datos considerados para caracterizar el mes i de un año tipo medio será el 50% del total de n años).

La aportación del **mes i de un año SECO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de datos cuyos **percentiles de excedencia sean superiores al 66%**. (De esta manera se asegura que el número de datos considerados para caracterizar el mes i de un año tipo seco será el 25% del total de n años).

III.4. En el mes i:

- Las series **H-M no tienen** diferencias significativas
- Las series **M-S tienen** diferencias significativas

En este caso la caracterización de año seco según la aportación anual es válida también para la caracterización mensual, pero no lo son las correspondientes a años medios y húmedos. Se procede como se recoge a continuación:

CRITERIO PARA CARACTERIZAR LA APORTACIÓN CORRESPONDIENTE A UN MES CUANDO HAY DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN LAS MEDIANAS DE LAS APORTACIONES MENSUALES DEL MES i CORRESPONDIENTES A LOS AÑOS MEDIOS Y HÚMEDOS.

A) PARA MES TIPO SECO

Variable: aportación mensual (mes i)
Datos: serie de valores correspondientes a las aportaciones mensuales (mes i) de los años SECOS.
Estimador: mediana de la serie

La aportación del **mes i de un año SECO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de aportaciones del mes i en años secos.

B) PARA MES TIPO HÚMEDO Y MEDIO

Variable: aportación mensual (mes i)
Datos: serie de valores correspondientes a las aportaciones mensuales (mes i) de los años HÚMEDOS y MEDIOS. (Esta serie estará formada, aproximadamente, por el 75% del total de n años, ya que el 25% restante es el que sirvió para caracterizar la aportación mensual en años secos).

Estimadores: Percentil de excedencia del valor $X = 1 - \text{fra}(X)$
 $\text{fra}(X) = m / (p+1)$

Donde:

fra = frecuencia relativa acumulada correspondiente a la aportación anual X (= probabilidad de que la variable tome un valor menor o igual a X) obtenida por la expresión de Weibull
m = posición que ocupa ese valor X en la serie ordenada de menor a mayor
p = número total de datos en la serie

La aportación del **mes i de un año HÚMEDO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de datos cuyos **percentiles de excedencia sean inferiores al 33%**. (De esta manera se asegura que el número de datos considerados para caracterizar el mes i de un año tipo húmedo será el 25% del total de n años).

La aportación del **mes i de un año MEDIO** se caracteriza por la **mediana** correspondiente a la de los valores de la serie de datos cuyos **percentiles de excedencia sean superiores al 33%**. (De esta manera se asegura que el número de datos considerados para caracterizar el mes i de un año tipo medio será el 50% del total de n años).

La **Figura nº AI.3** resume el proceso expuesto para la determinación de las aportaciones mensuales definitorias de cada tipo de año.

Figura nº AL3.- Proceso de caracterización de las aportaciones mensuales correspondientes a cada tipo de año (PE= Percentil de excedencia)

