

# Diseño de un índice para la medición de la calidad fisicoquímica del agua piscícola. Aplicación a la Cuenca Hidrográfica del Júcar (\*)

EDUARDO BEAMONTE CÓRDOBA (\*\*)

JOSÉ D. BERMÚDEZ EDO (\*\*\*)

ALEJANDRO CASINO MARTÍNEZ (\*\*)

ERNESTO J. VERES FERRER (\*\*)

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua constituye un elemento esencial para la vida y para las actividades económicas. Esta frase tópica, insistentemente repetida, y arranque de libros, conferencias y publicaciones desde que se formuló en 1968 en la Carta del Agua del Consejo de Europa, encierra una verdad que el tópico no ha podido ensombrecer (Ministerio de Medio Ambiente, 2000).

El concepto de calidad del agua –cuya especificación resulta necesariamente compleja, por la gran cantidad de elementos que en él intervienen– está íntimamente ligado al uso de la misma, en cuanto que no es lo mismo las exigencias requeridas por el agua destinada al consumo humano –las más exigentes–, que las obligadas para el agua de riego, en la que la permisibilidad es evidentemente mayor. Por ello, una calidad determinada ha de hacer referencia a un uso también preestablecido, presentando cada uno de ellos requerimientos específicos (Poch, 1999). Las categorías más usuales según empleos son las de las aguas prepotables, aguas piscícolas y aguas para el riego. En Beamonte *et al.* (2004a, 2004b, 2005 y 2006) se realizan sendos análisis estadísticos de la calidad del agua prepotable que es la destinada al consumo humano.

---

(\*) *Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Generalitat Valenciana con cargo al proyecto GV04B-221.*

(\*\*) *Departamento de Economía Aplicada. Universidad de Valencia.*

(\*\*\*) *Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universidad de Valencia.*

El presente trabajo se centrará en el segundo de los empleos citados, el del agua piscícola, es decir, el de las *aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces*. La diferente normativa aplicable a este tipo de aguas exige modificar la metodología estadística utilizada en los tres trabajos citados anteriormente.

Los requerimientos específicos sobre la calidad del agua vienen recogidos en la legislación básica de la Unión Europea. La calidad del agua piscícola se define en función de un conjunto de características fisicoquímicas o parámetros, así como de sus valores de aceptación o de rechazo. Aquellas aguas que cumplen con los estándares preestablecidos para ese conjunto de características consideradas son declaradas aptas y no requieren tratamientos previos para la mejora de su calidad.

Un problema adicional que se plantea a la hora de valorar la calidad de un agua concreta consiste en la integración del conjunto de parámetros que la definen en un único valor o índice. De hecho, las exigencias de control por parte de la Administración precisan definir una clasificación de la calidad del agua en la que queden integrados de forma inequívoca todos y cada uno de los posibles conjuntos de características.

Recientemente, en la literatura nacional han aparecido intentos para la definición de un índice global para la medición de la calidad del agua. Concretamente, en Beamonte *et al.* (2004b y 2005) se define un índice con estos objetivos, aplicado al agua prepotable. El presente trabajo pretende diseñar un índice para el caso del agua de uso piscícola, efectuando una aplicación del mismo al conjunto de estaciones de control que la Confederación Hidrográfica del Júcar tiene distribuidas en su cuenca para el control de la calidad de las aguas.

## 2. LA CALIDAD DEL AGUA PISCÍCOLA

La normativa que recoge en la actualidad las especificaciones que debe satisfacer el agua piscícola es la siguiente:

Directiva 78/659/CEE que define la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces, que ha sido transpuesta a la normativa española por el R.D. 927/1988 y la O.M. 16/12/1988.

Decisión 95/337/CE que establece la información que los Estados miembros deben remitir a la Comisión de la Unión Europea sobre el cumplimiento de las diversas Directivas relacionadas con la calidad de las aguas y, entre ellas, la 78/659/CEE.

De forma resumida, los principales aspectos de la Directiva 78/659/CEE son los siguientes:

- Los Estados miembros deben efectuar una declaración de las aguas salmonícolas y aguas ciprinícolas, que son aquellas aguas continentales, corrientes o estancadas objeto de protección por la Directiva, a fin de mejorar su calidad para que vivan o puedan vivir, si se redujera la contaminación, peces pertenecientes a especies indígenas que presentan diversidad natural, o especies cuya presencia se considera deseable, a efectos de la gestión de las aguas, por parte de las autoridades competentes de los Estados miembros.
- Se fijan 14 parámetros, todos ellos características fisicoquímicas, para la valoración de la calidad del agua para la vida de los peces. Para cada parámetro y tipo de agua (salmonícola o ciprinícola) se fijan unos valores según el tipo de agua declarada. Se distingue entre valores imperativos (I) y guía (G). Los primeros son obligatorios para definir la valoración de la calidad del agua, mientras que los últimos son aconsejables y, en cualquier caso, resultan ser características cuyo control de calidad debe seguirse como indicativo de la misma. También se aceptan excepciones (O) sobre los límites de admisibilidad de ciertos parámetros, debido a las condiciones geológicas por las que discurre el agua o por las condiciones medioambientales propias del país o zona considerada. Los parámetros y sus valores de admisibilidad se recogen en el cuadro 1.
- Se determinan las frecuencias mínimas de muestreo y los métodos de análisis para cada parámetro, así como el procedimiento de cálculo para establecer el cumplimiento de los límites de calidad.

Próximamente, la Directiva Marco sobre el Agua 2000/60/CE, de inminente aplicación, enfatiza la exigencia de calidad para las aguas continentales. Incrementa sustancialmente el número de parámetros definitorios de la calidad, introduciendo parámetros biológicos -diatomeas, macrofitos, etc.- para definirla, y que obligan a los Organismos de Cuenca a establecer redes de control de la calidad biológica de las aguas, en paralelo a las que ya existían para los parámetros fisicoquímicos (Pujante, 2003). Sin embargo, en este momento esos parámetros de calidad biológica no se han empezado a tomar sistemáticamente en las estaciones de control de la red ICA, por lo que en este trabajo estudiamos únicamente los parámetros fisicoquímicos detallados en el cuadro 1.

También de forma resumida, los principales aspectos de la Decisión 95/337/CE son los siguientes:

## Cuadro 1

## PARÁMETROS Y LÍMITES DE CALIDAD

Parámetro	Aguas salmonícolas		Aguas ciprinícolas	
	G	I	G	I
Temperatura (°C)		1.5º 21.5 (O) 10º (O)		3º 28 (O) 10 (O)
Oxígeno disuelto (mg/l O <sub>2</sub> )	50% ≥ 9 100% ≥ 7	50% ≥ 9 100% ≥ 5	50% ≥ 8 100% ≥ 5	50% ≥ 7 100% ≥ 4
pH		6-9 (O)		6-9 (O)
Materias en suspensión (mg/l)	" 25 (O)		" 25 (O)	
DBO <sub>5</sub> (mg/l O <sub>2</sub> )	" 3		" 6	
Fósforo total (mg/l P)	0,2		0,4	
Nitritos (mg/l NO <sub>2</sub> )	" 0,01		" 0,03	
Compuestos fenólicos (mg/l C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH)		Criterio de sabor		Criterio de sabor
Hidrocarburos de origen petrolífero		Criterios visuales, de sabor y salud de los peces		Criterios visuales, de sabor y salud de los peces
Amoníaco no ionizado (mg/l NH <sub>3</sub> )	" 0,005	" 0,025	" 0,005	" 0,025
Amoníaco total (mg/l NH <sub>4</sub> )	" 0,04	" 1	" 0,2	" 1
Cloro residual total (mg/l HOCl)	" 0,005	" 0,005		
Cinc total (mg/l Zn)		" 0.3		" 1
Cobre soluble (mg/l Cu)	" 0,4		" 0,4	

- Por una parte, la necesidad de determinar el número, longitud y superficie total de ríos y lagos designados como aguas salmonícolas y ciprinícolas, especificando los detalles geográficos correspondientes. Doadrio *et al.* (1991) realizaron un estudio previo, basado en criterios científicos, en el que se definieron las zonas de especial interés piscícola, empleando como criterio de especial importancia el de la existencia de especies autóctonas.
- Por otra, la especificación detallada del número, longitud y superficie de ríos y lagos que cumplen la Directiva, con expresión de los motivos, excepciones aplicables y medidas previstas en caso de incumplimiento.

En el ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar son cuatro los tramos de interés para la protección de la vida piscícola declarados a las autoridades medioambientales de la UE, todos ellos catalogados como ciprinícolas. Son el tramo de Lorcha, en el río Serpis; el tramo de Villar de Olalla, en el Júcar; el tramo de Chulilla, sobre el

río Turia; y, finalmente, el tramo de Olba, sobre el Mijares. Existen otras zonas definidas como *piscícolas de interés regional*, cuya calidad también se controla a través de las 185 estaciones de control para el agua piscícola, y cuya información, en cualquier momento, podría incorporarse al informe facilitado a las autoridades europeas.

La frecuencia mínima de muestreo o de inspección, para todos los parámetros, es mensual. En casos en los que se pudieran producir variaciones diurnas significativas, o de existir vertidos que alteraran la composición del agua, la frecuencia anterior podría aumentarse, incluso, a más de dos tomas diarias. Las tomas muestrales se efectúan en un mismo lugar de muestreo en las 185 estaciones de control para el agua piscícola de la red ICA de la Confederación Hidrográfica del Júcar, coincidentes muchas de ellas con las de la antigua red COCA.

### 3. ASIGNACIÓN DE LA CALIDAD A UN AGUA CONCRETA

Para comprobar el nivel de calidad de un agua concreta se tienen en cuenta los porcentajes de muestras que cumplen las especificaciones acerca de los límites de los valores imperativos (I) y guía (G) de cada parámetro. Se utiliza el siguiente criterio general: para cada parámetro, *al menos el 95 por ciento de las muestras deben cumplir con los límites de calidad propuestos*. Dado que el 95 por ciento sobre 12 es un valor no entero, la condición anterior se adapta, en un muestreo normal de 12 tomas anuales, en que basta que una sola muestra no verifique la calidad exigida para que el agua consiguiente sea catalogada como de calidad no apta, lo que supone un percentil real del 91,7 por ciento.

Existen tres parámetros para los que se exige un cumplimiento de los límites de calidad en todas las muestras: la temperatura, el oxígeno disuelto y las materias en suspensión, si bien se aceptan posibilidades de excepción en la temperatura –en caso de vertidos térmicos– y en las materias en suspensión –en caso de crecidas, inundaciones o catástrofes naturales–, que deben justificarse en caso de observación de valores anómalos.

En su conjunto, un agua concreta será declarada no apta cuando lo sea por uno solo de sus parámetros. El percentil 95 para las muestras cumplidoras de los límites establecidos –o, consecuentemente, el percentil 5 para las aguas no válidas– se configura, pues, como el nivel esencial sobre el que pivota la posterior declaración de validez para la calidad del agua de uso piscícola.

Para el caso de las estaciones de control sobre las que, por cualquier motivo, se haya realizado un muestreo reducido, el porcentaje de cumplimiento ha de ser del 100 por cien, lo que implica que todas

las medidas deben estar dentro de las especificaciones de calidad de la normativa.

El cumplimiento o incumplimiento de la calidad para un agua determinada se define sólo con relación a los valores imperativos y aun entre ellos se debe tener en cuenta los criterios de excepcionalidad previstos en la normativa. El cumplimiento o incumplimiento con relación a los valores guía lo es simplemente a título informativo, no precisando de la justificación detallada que sí se exige en el caso de los imperativos.

A fin de englobar las exigencias de calidad de todos los parámetros en un solo valor o indicador, Beamonte *et al.* (2004b) definen un índice global de calidad aplicado al agua prepotable. Las exigencias y salvaguardias sanitarias asociadas a este uso del agua obligan a ser mucho más cuidadosos a la hora de establecer sus parámetros de calidad –21 características imperativas–, así como los límites admisibles, que en el caso del agua para uso piscícola. De hecho, las tres categorías de calidad admisibles para el agua prepotable –A1, A2 y A3 en la terminología española– quedan reducidas a una única condición de idoneidad para el agua destinada a la vida de los peces.

En lo que sigue, vamos a adaptar el índice de calidad citado antes, tanto desde un punto de vista estrictamente administrativo como bajo una perspectiva probabilística, aplicándolo a una selección de estaciones de control, precisamente las 70 estaciones en las que se dispone de al menos 12 datos para todos sus parámetros, a lo largo del periodo comprendido entre mayo de 1999 y abril del 2002. En el anexo se recogen estas estaciones, con el correspondiente valor del índice de calidad definido en los apartados siguientes. Asimismo, en la dirección web <http://213.0.70.229/REDESCALIDAD/> de la Confederación Hidrográfica del Júcar puede consultarse un mapa interactivo de la red de estaciones de control.

#### **4. UN ÍNDICE DETERMINISTA PARA LA CALIDAD FÍSICOQUÍMICA DEL AGUA PISCÍCOLA**

El criterio administrativo para valorar la calidad de un agua piscícola es muy simple, en cuanto que responde a la determinación dicotómica de aptitud o no aptitud. Sin embargo, es posible establecer una gradación dentro de las situaciones de no aptitud, al definir el número de parámetros que no satisfacen los límites de calidad exigidos como medida de la calidad del agua. Así pues, y considerando sólo los *k* parámetros con valores imperativos que son los que tienen incidencia real en la clasificación de la calidad, para una muestra de

agua  $M$ , definimos su valor ( $M$ ) como el número  $n \leq k$  de parámetros que están dentro de sus respectivos límites de calidad.

Dadas dos muestras de agua,  $M_1$  y  $M_2$ , cuyas calidades respectivas vienen dadas por valor ( $M_1$ ) =  $n_1$  y valor ( $M_2$ ) =  $n_2$ , decimos que  $M_1$  es de mejor calidad que  $M_2$ , denotándolo  $M_1 > M_2$ , si y sólo si  $n_1 > n_2$ . Serán de igual calidad,  $M_1 = M_2$ , si y sólo si valor ( $M_1$ ) = valor ( $M_2$ ).

La definición anterior permite ordenar, de peor a mejor, todas las posibles calidades del agua de uso piscícola, permitiendo crear un índice de calidad que coincida con el rango que ocupa el valor de la muestra estudiada. Así pues, el índice de calidad de un agua piscícola coincidirá con su valor de calidad,  $I(M) = \text{valor}(M)$ .

El rango de valores del índice es el conjunto de enteros pertenecientes al intervalo  $[0, k]$ , correspondiendo a 0 la peor calidad y a  $k$  la mejor. Su lectura inversa es inmediata. Un valor del índice  $k_1$  supone, por la misma definición, que el agua analizada tiene  $k_1$  parámetros con valores imperativos dentro de los límites de calidad, frente a los  $k - k_1$  que no los cumplen.

De todos los valores del índice anterior solamente el máximo  $k$  implica la aptitud del agua para la vida de los peces. Todos los demás casos exigirían una justificación y análisis de las causas de incumplimiento.

A fin de expresar la calidad de un agua piscícola en términos relativos, lo que facilita la comparación de las calidades de aguas distintas, proponemos relativizar la definición de  $I(M)$  dividiendo su valor por el número de parámetros  $k$  y multiplicando por 100. De esta forma, en escala de 0 a 100, definiremos en lo que sigue el índice de calidad para una muestra  $M$  de agua piscícola a partir de la expresión:

$$Ia(M) = \frac{\text{valor}(M)}{k} \times 100$$

para la que un valor 0 está expresando la peor de las calidades posibles, frente al valor 100 que indica la mejor calidad.

## 5. UN ÍNDICE CONSIDERANDO INCERTIDUMBRE

Sea  $Y$  la variable aleatoria que representa a una característica fisicoquímica concreta del agua, cuya calidad es medida en una determinada estación de control. Para clasificar su aptitud de calidad habrá que comparar  $Y$  con el límite de calidad establecido en la normativa.

Sea  $\mu$  la probabilidad de que el valor de  $Y$  se encuentre dentro de los niveles de calidad exigidos. El criterio que plantea la normativa es

equivalente a estimar  $\mu$  mediante las correspondientes frecuencias relativas de los datos observados,  $\hat{\mu}$ . Si el estimador de  $\mu$ ,  $\hat{\mu}$ , es igual a 1, o al menos superior a 0,95 para aquellos parámetros que admiten alguna observación de mala calidad, el nivel de calidad se considera apto. En caso contrario, no es apta para el uso piscícola.

Este criterio administrativo admite que existe incertidumbre en el problema, al utilizar las observaciones para estimar  $\mu$ , si bien se olvida de la incertidumbre inherente al estimador puntual, proporcionando una clasificación rotunda, que parece no admitir la más mínima duda.

En concreto, el criterio administrativo está basado en observaciones mensuales para una clasificación anual, y establece lo siguiente. Los parámetros temperatura, oxígeno disuelto y materias en suspensión serán considerados de buena calidad si y sólo si las doce observaciones están en el rango establecido en la normativa, tal como se recoge en el cuadro 1 (al oxígeno disuelto también se le exige que al menos la mitad de las observaciones supere cierto valor intermedio también recogido en el cuadro 1), esto es, si  $\hat{\mu} = 1$ . Al resto de los parámetros se les exige que al menos once de las doce observaciones pertenezcan al rango de valores establecido en la normativa, esto es, que  $\hat{\mu} \geq 11/12$ .

Alternativamente, nuestra propuesta consiste en proponer una clasificación dada mediante una probabilidad  $p$ —la probabilidad de que, dadas las observaciones disponibles, las próximas doce observaciones cumplan las condiciones exigidas por la normativa y comentadas en el párrafo anterior—, admitiendo la incertidumbre presente en el problema.

Para el agua de uso piscícola no es posible utilizar la metodología estadística empleada en Beamonte *et al.* (2004b y 2005), puesto que la normativa para este tipo de aguas exige su cumplimiento en el 100 por cien de las observaciones, lo que hace referencia al percentil 100, que no puede estimarse. En lugar de poner el énfasis en la estimación de un percentil de la distribución, en este trabajo utilizamos distribuciones predictivas sobre las próximas 12 observaciones, para obtener la probabilidad predictiva de que todas las observaciones próximas cumplan con las especificaciones normativas.

Esto es fácil de abordar desde una perspectiva bayesiana, considerando a la probabilidad desconocida  $\mu$  como una variable aleatoria, obteniendo su distribución final una vez observados los datos y calculando la distribución predictiva asociada a las próximas doce observaciones. A partir de esa distribución predictiva se calcula inmediatamente  $p$ .

Cada muestra de agua  $M$  tendrá asociado, por tanto, un vector de calidad, que es el vector de probabilidades, donde cada una de sus componentes es la probabilidad  $p$  asociada a su respectivo parámetro imperativo. Definimos entonces el índice probabilístico de calidad con la expresión:

$$I_p(M) = \frac{100}{k} \times \sum_{i=1}^k p_i$$

donde  $k$  es el número de parámetros con valores imperativos.

Una solución no paramétrica se puede obtener discretizando la variable aleatoria original  $Y$  en las dos categorías, según el límite de calidad normativo. La variable así transformada,  $X$ , debe seguir una distribución Bernoulli cuyo parámetro es precisamente  $\mu$ , la probabilidad de que el parámetro esté en los límites aceptables de calidad.

Utilizando la distribución previa de Jeffreys,  $Be(1/2, 1/2)$ , (ver, por ejemplo, Box y Tiao, 1973, página 35), la distribución a posteriori sobre  $\mu$  será también Beta con parámetros  $a = r + 0,5$  y  $b = n - r + 0,5$ , donde  $n$  es el número de observaciones realizadas y  $r$  es el número de datos observados dentro de los niveles de calidad. La distribución predictiva sobre la variable aleatoria  $R$  que representa el número de observaciones en el intervalo aceptable de calidad entre  $N$  nuevas observaciones, se calcula como:

$$\Pr(R | N, n, r) = \int_0^1 \Pr(R | N, \mu) Be(\mu | a, b) d\mu$$

donde  $\Pr(R | N, \mu)$  es una probabilidad Binomial de parámetros  $N$  y  $\mu$ , mientras que  $Be(\mu | a, b)$  es la función de densidad Beta de parámetros  $a$  y  $b$ . Por tanto:

$$\Pr(R | N, \mu) = \frac{N!}{R!(N-R)!} \mu^R (1-\mu)^{N-R} \text{ y}$$

$$Be(\mu | a, b) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \mu^{a-1} (1-\mu)^{b-1}$$

con lo que la integral anterior resulta ser:

$$\Pr(R | N, n, r) = \frac{N!}{R!(N-R)!} \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \frac{\Gamma(a+b)\Gamma(b+N-R)}{\Gamma(a+b+N)} \text{ si } R = 0, 1, \dots, N$$

Una vez obtenido este resultado, la probabilidad  $p$  asociada a aquellos parámetros que exigen que las doce observaciones estén dentro de los límites aceptables de calidad se calcula como:

$$p = \Pr(R = 12 | N = 12, a, b) = \frac{\Gamma(a+b)\Gamma(a+12)}{\Gamma(a)\Gamma(a+b+12)}$$

Para los parámetros en los que se exige que al menos once de las doce observaciones estén dentro de los límites aceptables de calidad:

$$p = \Pr(R \geq 11 | N = 12, a, b) = \frac{\Gamma(a+b)\Gamma(a+12)}{\Gamma(a)\Gamma(a+b+12)} + 12b \frac{\Gamma(a+b)\Gamma(a+11)}{\Gamma(a)\Gamma(a+b+11)}$$

El único caso especial es el del parámetro oxígeno disuelto, para el que existen dos criterios que deben darse a la vez. Así, por ejemplo (ver cuadro 1), utilizando los criterios imperativos ciprinícolas, todas las observaciones de oxígeno disuelto deben ser superiores a 4 y, al menos la mitad de ellas, superiores a 7. Esto nos obliga a considerar tres categorías en la discretización de los datos sobre oxígeno disuelto: valores inferiores a 4, valores entre 4 y 7 y, por último, los valores superiores a 7. El desarrollo beta-binomial presentado más arriba no es adecuado para esta situación.

En este caso, la distribución de los datos de oxígeno disuelto, una vez discretizados, será multinomial, con tres categorías posibles y cuyos parámetros asociados serán  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , y  $\theta_3$ , sujetos a la restricción  $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 1$ . Utilizando la distribución a priori no informativa de Jeffreys (ver, por ejemplo, Box y Tiao, 1973, página 55), que resulta ser Dirichlet con todos sus parámetros iguales a 0,5, (ver, por ejemplo, DeGroot, 1970, página 50, para un resumen de las propiedades más interesantes de la distribución Dirichlet), la distribución a posteriori también es Dirichlet con parámetros  $a = 0,5 + r_1$ ,  $b = 0,5 + r_2$  y  $c = 0,5 + r_3$  siendo  $n = r_1 + r_2 + r_3$  el número de datos observados en la categoría  $i = 1, 2$  ó  $3$ . La distribución predictiva se obtiene resolviendo la integral:

$$\Pr(R_1, R_2, R_3 | N, a, b, c) = \int_{\Theta} \Pr(R_1, R_2, R_3 | N, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \text{Di}(\theta | a, b, c) d\theta_1 d\theta_2 d\theta_3,$$

Donde  $(R_1, R_2, R_3)$  es el vector aleatorio que representa el número de observaciones futuras en cada una de las tres categorías consideradas, cuya suma es el número  $N$  de observaciones que estamos prediciendo.

El primer factor dentro de la integral anterior es multinomial y el segundo factor Dirichlet. Como estas distribuciones son conjugadas su producto es proporcional a una Dirichlet, por tanto, la integral anterior se resuelve inmediatamente resultando ser:

$$\Pr(R_1, R_2, R_3 | N, a, b, c) = \frac{N!}{R_1! R_2! R_3!} \frac{\Gamma(a+b+c)}{\Gamma(a)\Gamma(b)\Gamma(c)} \frac{\Gamma(a+R_1)\Gamma(b+R_2)\Gamma(c+R_3)}{\Gamma(a+b+c+N)}$$

si  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  son enteros no negativos cuya suma es  $N$ .

En nuestro caso, la probabilidad  $p$  buscada es:

$$\Pr(R_1 = 0, R_2 \leq 6 | N = 12, a, b) = \frac{\Gamma(a+b+c)}{\Gamma(b)\Gamma(c)} \sum_{R=0}^6 \frac{12!}{R!(12-R)!} \frac{\Gamma(b+R)\Gamma(c+12-R)}{\Gamma(a+b+c+12)}$$

Las tres expresiones que se han obtenido para  $p$  son de cálculo inmediato utilizando una hoja de cálculo, como puede ser EXCEL.

## 6. APLICACIÓN

El anexo recoge, para las 70 estaciones de control consideradas, los valores del índice relativo de calidad determinista (administrativo) y probabilístico. El coeficiente de correlación entre ambos es de  $r = 0,709$ , lo que significa que están linealmente relacionados pero no demasiado (el valor de  $r$  es estadísticamente significativo, con un  $p$ -valor inferior a una milésima, al contrastarlo con el valor 0). Esa relación no es muy fuerte, pues el índice administrativo tan sólo se basa en un estimador puntual de la probabilidad de clasificación como agua apta, sin tener en cuenta el posible error del estimador. El índice probabilístico, por el contrario, tiene en cuenta la incertidumbre sobre el estimador, por lo que también depende del número de datos, esto es, de la cantidad de información disponible.

Así, si el número de datos es pequeño, el índice probabilístico no se alejará en exceso del valor central 0,5, confiando poco en el estimador puntual, ya que éste tendrá asociado un error estándar grande; sin embargo, con bastantes datos el índice probabilístico sí que tomará valores extremos cercanos a 0 ó a 1, confiando plenamente en la estimación puntual. Esos valores extremos, 0 ó 1, son los únicos que toma el índice administrativo, independientemente del número de datos disponibles.

Este comportamiento es también causa de que el índice probabilístico tenga una menor varianza y de que el máximo y el mínimo sean más extremos en el índice administrativo, como se observa en el cuadro 2, en el que se muestra una pequeña descripción de los dos índices obtenidos en las 70 estaciones consideradas. En ambos índices se aprecia asimetría negativa y apuntamiento por debajo de la Normal.

Cuadro 2

DESCRIPTIVOS DE  $I_a$  e  $I_p$ 

Estadístico	Índice probabilístico $I_p$	Índice probabilístico $I_a$
N.º datos	70	70
Mínimo	73,8	66,7
Máximo	95,8	100
Media	89,538	90
Desviación típica	4,58	9,1
Asimetría	-1,53	-0,84
Curtosis	2,397	0,538

El índice probabilístico, al tomar valores en un intervalo, permite una clasificación de las estaciones según su calidad en un todo continuo que es más precisa que la conseguida a través del índice administrativo, que sólo toma valores discretos, por lo que son muy frecuentes los empates entre estaciones. Los correspondientes histogramas de los gráficos 1 y 2 ilustran esta apreciación.

El cuadro 3 recoge los valores de los índices administrativo y probabilístico de las cinco peores estaciones de control, clasificadas según la calidad de su agua piscícola medida a través del índice probabilístico.

Gráfico 1

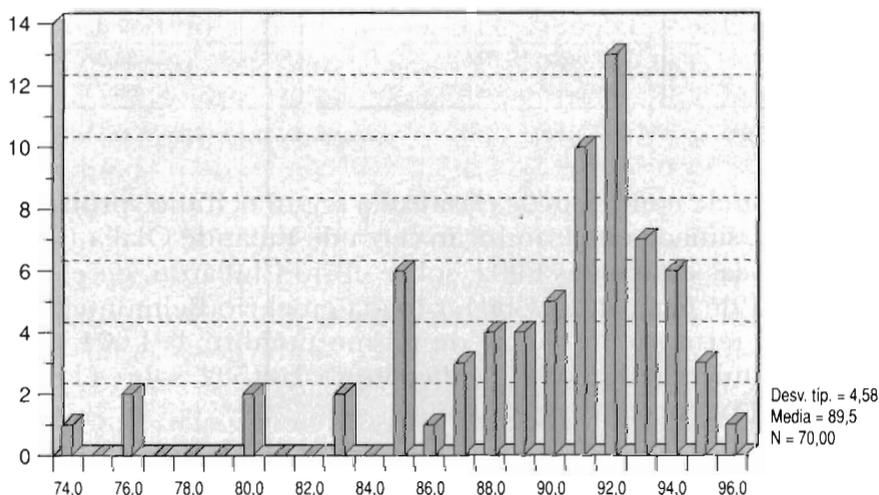
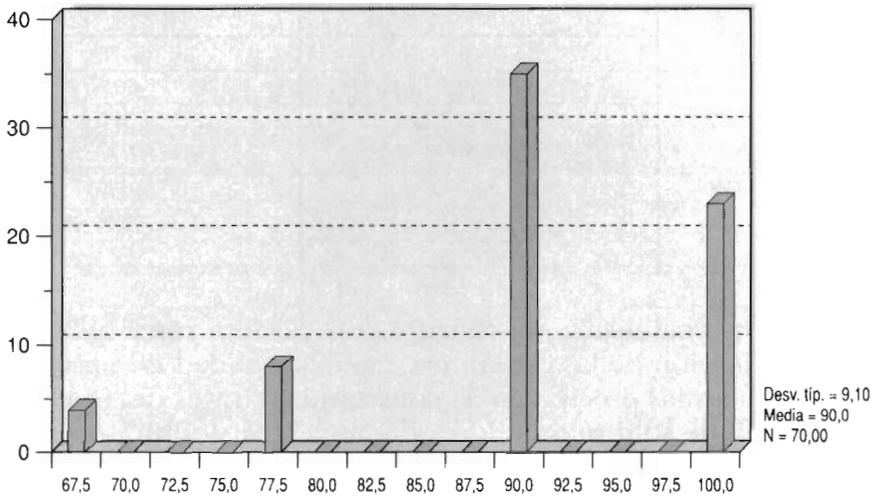
Histograma de  $I_p$ 

Gráfico 2

Histograma de  $I_a$



Cuadro 3

$I_a$  e  $I_p$  DE LAS CINCO PEORES ESTACIONES

Estación	Índice probabilístico $I_p$	Índice probabilístico $I_a$
F002	73,8	77,8
E002	76,3	66,7
G004	76,4	77,8
L604	79,5	88,9
K502	79,6	66,7

La estación de control peor clasificada según el índice probabilístico es la F002, situada en el río Júcar, cerca de Villar de Olalla (Cuenca). Le siguen las estaciones E002, sobre el río Chillarón, en el término municipal de Cuenca; la G004, situada en el río Belmontejo (Cuenca), en el término municipal de mismo nombre; la L604, en el río Serpis, municipio de Lorcha (Alicante); y la K502, sobre el río Júcar, en Cotes (Valencia).

Finalmente, el cuadro 4 recoge los valores de los índices administrativo y probabilístico de las cinco estaciones de control mejor clasifi-

cadras, atendiendo a la calidad de su agua piscícola medida a través del índice probabilístico.

Cuadro 4

#### la e Ip DE LAS CINCO MEJORES ESTACIONES

Estación	Índice probabilístico $I_p$	Índice probabilístico $I_a$
B801	94,2	100,0
M608	94,9	100,0
E204	94,9	100,0
M002	95,0	100,0
E202	95,8	100,0

La estación de control mejor clasificada según el índice probabilístico es la E202, situada en el río Mayor del Molinillo, en el término municipal de Cañete (Cuenca). Le siguen las estaciones M002, en el río Cubillo, término municipal de Robledo (Albacete); la E204, sobre el río Tejadillos, también en Cañete; la M608, en la cola del embalse de Guadalest, que regula las aguas del río del mismo nombre, en el término municipal de Beniardá (Alicante); y la B801, sobre el río Cenía, en Puebla de Benifasar (Castellón).

A partir del índice  $I_p$  puede establecerse una clasificación de la calidad del agua para uso piscícola que, oportunamente ubicada sobre un mapa, proporcionaría una idea geográfica de la distribución por calidades de las estaciones de control de dicha agua. Sobre unas coordenadas geográficas hemos observado una tendencia a empeorar la calidad sobre un hipotético eje noroeste a sureste que recorriera la geografía de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

## 7. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se define un índice de carácter probabilístico para evaluar la calidad del agua de uso piscícola, efectuando una aplicación del mismo al conjunto de estaciones de medición que la Confederación Hidrográfica del Júcar tiene distribuidas en su cuenca para el control de la calidad de las aguas.

Los resultados obtenidos se comparan, además, con los correspondientes a la aplicación de un índice determinista construido a partir del criterio utilizado por la Administración para comprobar el nivel de calidad de un agua concreta.

Los valores obtenidos con los dos índices, para las 70 estaciones de control finalmente consideradas, muestran una relación lineal estadísticamente significativa, aunque dicha relación no es muy fuerte. Hay que tener en cuenta que el índice administrativo se basa, tan sólo, en un estimador puntual de la probabilidad de clasificación como agua apta, sin tener en cuenta el posible error del estimador. Por el contrario, el índice probabilístico tiene en cuenta la incertidumbre sobre el estimador.

El índice probabilístico permite una clasificación de las estaciones según su calidad en un todo continuo que es más precisa que la conseguida a través del índice administrativo, que sólo toma valores discretos.

La representación gráfica de la posición de las estaciones de control, según los valores que el índice proporciona para cada una de ellas, puede dar una idea geográfica de la distribución por calidades de dichas estaciones. Se puede apreciar una tendencia a empeorar la calidad del agua de uso piscícola sobre un hipotético eje noroeste a sureste a lo largo de la geografía de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

Por último, destacar que con la metodología propuesta en este trabajo se pretende avanzar en la mejora de los procedimientos utilizados en la evaluación de la calidad del agua y, consecuentemente, contribuir a la adecuada toma de decisiones en materia de política medioambiental.

## BIBLIOGRAFÍA

- BEAMONTE, E.; BERMÚDEZ, J.; CASINO, A. y VERES, E. (2004a): «La calidad del agua en ciertas estaciones de control del canal Júcar-Turía (período 1994-2001)». *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, 201: pp. 105-126.
- BEAMONTE, E.; BERMÚDEZ, J.; CASINO, A. y VERES, E. (2004b): «Un indicador global para la calidad del agua. Aplicación a las aguas superficiales de la Comunidad Valenciana». *Estadística Española*, 156: pp. 357-384.
- BEAMONTE, E.; BERMÚDEZ, J.; CASINO, A. y VERES, E. (2005): «A global stochastic index for water quality: the case of the River Turia (Spain)». *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 10: pp. 424-439.
- BEAMONTE, E.; BERMÚDEZ, J.; CASINO, A. y VERES, E. (2006): «A statistical study of the surface water quality in the surroundings of Valencia town (Spain)». Aceptado en *Journal of Environmental Management*.
- BOX, G. E. P y TIAO, G. C. (1973): *Bayesian Inference in Statistical Analysis*. Addison-Wesley, Reading.

- DEGROOT, M. H. (1970): *Optimal Statistical Decisions*. McGraw-Hill. New York.
- DOADRIO, I.; ELVIRA, B. y BERNAT, Y. (1991): *Peces continentales españoles: inventario y clasificación de zonas fluviales*. ICONA. Madrid.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2000): *Libro Blanco del agua en España*. Madrid.
- POCH, M. (1999): *Las calidades del agua*. Rubes Editorial S.L. Barcelona.
- PUJANTE, A. M. (2003): «La xarxa de qualitat biològica en la Conca del Xúquer». *Mètode*, 38: pp. 80-84.

Anexo

ÍNDICES ADMINISTRATIVO Y PROBABILÍSTICO PARA LAS 70 ESTACIONES  
CON 12 O MÁS DATOS POR PARÁMETRO

Estación	Índice probabilístico <i>Ip</i>	Índice administrativo <i>Ia</i>	Estación	Índice probabilístico <i>Ip</i>	Índice administrativo <i>Ia</i>
B801	94,2	100	G004	76,4	77,8
C302	89,7	66,7	G206	93,9	100
C402	83,4	77,8	G207	86,8	66,7
C403	89,2	77,8	G208	91,8	88,9
D103	92	88,9	G212	92,1	88,9
D104	85,1	77,8	G401	92,5	88,9
D201	93,5	100	G403	85,4	88,9
D501	94,1	100	H102	93,8	100
D503	85,8	88,9	H302	92,8	100
D506	93,2	100	H401	88,8	88,9
D508	87,7	88,9	H403	91,8	88,9
E002	76,3	66,7	H601	87,5	88,9
E104	92,6	88,9	I302	94	100
E108	87,8	88,9	I404	90,5	88,9
E202	95,8	100	I505	90,6	88,9
E203	91	88,9	J201	89,8	88,9
E204	94,9	100	J301	92,5	100
E303	92,4	100	J302	90,7	88,9
E304	91,7	100	J403	91,8	88,9
E502	92	100	J404	91,1	88,9
E503	84,9	88,9	J405	88,4	88,9
E506	91,2	100	J406	92	100
E511	91,2	100	K502	79,6	66,7
E512	85,3	88,9	K504	92,7	88,9
E602	90,5	88,9	K508	83,2	77,8
E606	91,1	88,9	K512	89,1	88,9
E608	86,9	77,8	K513	89,3	88,9
E609	92,2	88,9	L102	90,9	88,9
F002	73,8	77,8	L604	79,5	88,9
F201	91,8	100	L702	90,4	88,9
F301	87,4	77,8	M001	90,6	88,9
F401	91,9	100	M002	95	100
F502	85,1	88,9	M004	93,2	100
F603	91	100	M608	94,9	100
F604	85,1	88,9	N703	92,7	88,9

## RESUMEN

### Diseño de un índice para la medición de la calidad fisicoquímica del agua piscícola. Aplicación a la Cuenca Hidrográfica del Júcar

El objetivo principal de este trabajo es proponer un índice para el estudio de la calidad fisicoquímica del agua, en un contexto probabilístico. Este índice se utiliza para evaluar la calidad del agua de uso piscícola. La metodología aquí propuesta se aplica a los datos observados en un amplio conjunto de puntos de muestreo ubicados en la cuenca hidrográfica del Júcar.

**PALABRAS CLAVE:** Agua de uso piscícola, calidad fisicoquímica del agua, índice de calidad.

## SUMMARY

### Construction of an index for the assessment of physical-chemical quality of water intended for fish life. Application to the Júcar river basin district

The aim of this paper is to propose an index for water quality into a probability context. This index is utilized to evaluate the physical-chemical quality of surface fresh water intended for fish life. The methodology proposed here is then applied to the data observed in a set of sampling points of the Júcar river basin district.

**KEYWORDS:** Water intended for fish life, physical-chemical water quality, quality index.