

# MODELIZACION PANEUROPEA DE LAS COMUNIDADES PISCICOLAS PARA LA DETERMINACION DEL ESTADO AMBIENTAL DE LOS RIOS: APLICACIÓN A LA CUENCA DEL TAJO

Joaquín Solana Gutiérrez<sup>1</sup>, Carlos Alonso González<sup>1</sup>, María Dolores Bejarano Carrión<sup>1</sup>, Diego García-de-Jalón Lastra<sup>1</sup>, Diego García-de-Jalón González<sup>1</sup>, Pierre Bady<sup>2</sup> y Didier Pont<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación de Hidrobiología, ETSI Montes, Universidad Politécnica de Madrid. Av. Ramiro de Maeztu s/n. Ciudad Universitaria. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: joaquin.solana@upm.es

<sup>2</sup>CEMAGREF. Unidad HYAX, BP31, Le Tholonet. 13612-AIX-EN-PROVENCE, Cedex 1 (Le Tholonet, France)

## Resumen

El presente artículo describe la metodología EFI+ cuyo objetivo es obtener el estatus ecológico de las masas de agua europeas basándose en variables descriptoras de las comunidades piscícolas. Partiendo de una base de datos paneuropea de inventarios de pesca eléctrica, se ha seleccionado un conjunto de variables descriptoras relativas a la riqueza, abundancia y densidad de las comunidades piscícolas que evalúan el estado ambiental de los ríos. Con el análisis, selección y mejora de este conjunto de variables ecológicas descriptoras se ha identificado a cuatro de ellas que presentan buenas propiedades estadísticas para medir el estado ambiental de los ríos en un contexto europeo. Mediante un proceso de modelización, estandarización y estratificación de estas variables descriptoras se han generado cuatro variables indicadoras ó métricas del estatus ecológico de los ríos. Para facilitar el cálculo de las métricas EFI+ se ha confeccionado una aplicación web cliente-servidor de acceso público. Finalmente, la metodología EFI+ ha sido aplicada a 66 puntos de muestreo de la cuenca del río Tajo, obteniéndose unos resultados que, por una parte, avalan la bondad de las variables descriptoras seleccionadas pero también conducen a un mejor replanteo de la zonación aplicada en las cuencas mediterráneas peninsulares.

Palabras clave: *Directiva Marco del Agua, Comunidad piscícola, Calidad fluvial, Métrica ecológica, Indicador ecológico*

## INTRODUCCION

El objetivo de la Directiva Marco del Agua (DMA) es crear un marco europeo para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas (COMISIÓN EUROPEA, 2000), a la vez que preservar el estado ecológico de las mismas. La DMA pide a los estados miembros

evaluar la calidad ecológica de los ríos y cursos de agua mediante métodos cuantificables y normalizados, de forma que puedan ser comparables geográfica y temporalmente. De acuerdo con la DMA, los componentes a considerar en la evaluación del estatus ecológico de un tramo de río son: el fitoplancton, los organismos fitobentónicos y macrofitas, los invertebrados bénticos y la ictiofauna.

La propia DMA establece unas pautas, condiciones de referencias y niveles para efectuar la evaluación del estatus ambiental: a) clasificar el tipo de río, b) definir las condiciones de referencia, c) realizar las muestras en los sitios de vigilancia y, d) evaluar la desviación en cinco estados de calidad ecológica: 1 Alta, 2 Buena, 3 Moderada, 4 Baja, 5 Mala.

## MATERIAL Y MÉTODOS

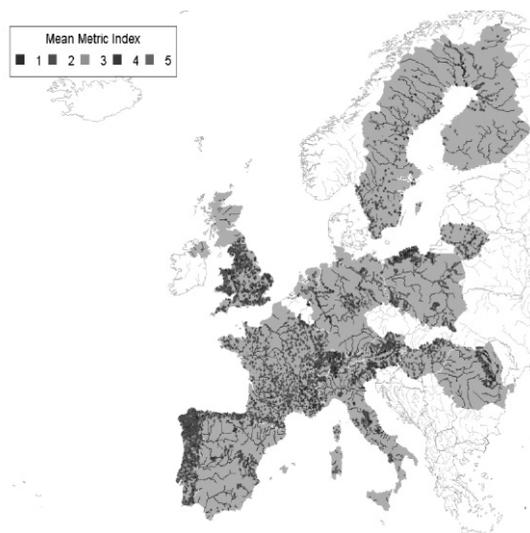
### European Fish Index

Entre 2001 y 2009 fueron llevados a cabo dos proyectos internacionales, FAME y EFI+, ambos financiados por la Unión Europea, cuyos objetivos eran el desarrollo, evaluación y aplicación de nuevos índices biológicos normalizados para evaluar el estado ecológico de las corrientes de agua en toda Europa. El principal resultado de estos dos proyectos ha sido EFI+, primer indicador biológico de ámbito paneuropeo para la evaluación de la calidad ambiental de los ríos basado en las comunidades piscícolas (PONT *et al.*, 2006; SCHMUTZ *et al.*, 2007).

El desarrollo de EFI+ se ha basado en FIDES (Fish Database of European Streams), base de datos que actualmente contiene informa-

ción sobre 29.509 muestreos realizados en 14.221 sitios de 2.700 ríos de toda Europa. En FIDES están registradas, además de los datos sobre comunidades piscícolas, las principales variables geográficas, físicas y ecológicas de los puntos de muestreo (Figura 1).

El indicador EFI+ (PONT *et al.*, 2007; BADCY *et al.*, 2009) está compuesto por un par de índices, 'Salmonid Fish Index' (SFI) y 'Cyprinid Fish Index' (CFI), obtenidos a partir de cuatro variables descriptoras seleccionadas entre un conjunto de 118 posibles variables descriptoras de las comunidades piscícolas (e.g., existencia de especies indicadoras, riqueza, densidad, abundancia de ciertos taxones y grupos funcionales, etc...). Para cada posible variable se construyó un modelo lineal generalizado (GLM) que estima el valor esperado de la variable descriptora en condiciones de referencia (sin presiones antrópicas). La selección del mejor modelo se realizó mediante el criterio de información de Akaike, pero siempre subordinado al cumplimiento de las hipótesis del modelo lineal: Normalidad, homocedasticidad, independencia residual, independencia entre covariantes y residuos (McCULLAGH & NELDER, 1989). Mediante análisis de varianza, métodos de remuestreo y análisis gráfico de los residuos de los GLMs se



**Figura 1.** Mapa de la Calidad Ecológica de los ríos Europeos según EFI+, obtenido a partir de FIDES (1 Alta, 2 Buena, 3 Moderada, 4 Pobre, 5 Mala)

determinó la capacidad indicadora de todas las variables descriptoras.

Como resultado se seleccionaron cuatro variables descriptoras (PONT, 2007; BADA, 2009): Riqueza de especies con reproducción en hábitats reófilos (RHPAR), densidad de especies intolerantes a la disminución de oxígeno (O2INTOL), densidad de especies con reproducción litofílica (LITH), y densidad de individuos pequeños (< 150 mm) de especies intolerantes a la degradación del hábitat (HINTOL).

A partir de estas cuatro variables descriptoras se derivan sus respectivas cuatro métricas ( $M_{RHPAR}$ ,  $M_{O2INTOL}$ ,  $M_{LITH}$ ,  $M_{HINTOL}$ ) que combinadas generan los índices SFI y CFI; el primero expresa la calidad del hábitat en los tramos salmonícolas, y el segundo la calidad del hábitat en zonas ciprinícolas.

$$SFI = (M_{HINTOL} + M_{O2INTOL})/2$$

$$CFI = (M_{RHPAR} + M_{LITH})/2$$

En principio, con esta pareja de índices se puede estimar la calidad ecológica de los ríos europeos según las características de las comunidades piscícolas que los habitan, aunque existe un conjunto de condicionantes y limitantes que se han de tener en cuenta y que inciden en el riesgo de clasificación errónea (BADA et al., 2009).

### Aplicación informática EFI+

Para facilitar la aplicación del método EFI+ se ha confeccionado una aplicación web cliente-servidor (EFI+ CONSORTIUM, 2009) con acceso público en <http://efi-plus.boku.ac.at/software/>

Esta aplicación está construida en lenguaje PHP, con ciertas rutinas en Java-Script y con los modelos estadísticos realizados en R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

La aplicación tiene dos interfases de entrada de datos (una para ficheros Excel y ASCII y otra para la introducción manual de datos), un módulo para el filtrado de errores y un conjunto de rutinas para clasificar a las especies en grupos taxonómicos y funcionales.

Aplicando los cuatro GLMs en los puntos de muestreo se obtienen los valores esperados de las cuatro variables descriptoras en condiciones de referencia. Las variables geográficas y físicas del tramo fluvial que son necesarias para la aplicación de los modelos son: la pendiente del río, la temperatura del mes de Julio, la temperatura

de Enero, la naturaleza del sedimento, la superficie de la cuenca de drenaje, la existencia de llanuras de inundación, la distancia al nacimiento del río, el origen del agua y la caracterización hidro-geomorfológica del tramo.

La aplicación EFI+ proporciona como resultados intermedios: los valores de las cuatro variables descriptoras en condiciones de referencia ( $E_i$ ), los valores muestrales ( $O_i$ ), y las distancias Pearson de las variables ( $R_i = \log(E_i + 1/O_i + 1)$ ). Estas últimas pueden ser utilizadas como métricas indicadoras del estatus ecológico del tramo del río.

Sin embargo, la metodología EFI+ modula las distancias Pearson para las distintas bioregiones europeas (ILLIES, 1967; SEGURADO et al., 2009) y principales tipos fluviales (Salmonícolas y ciprinícolas) (MELCHER et al., 2007). Así, cada distancia Pearson ( $R_i$ ) es centrada según la mediana obtenida en los lugares de referencia de cada bioregión  $j$  y tipo de fluvial  $q$  ( $MR_{ijq}$ ), y es dividida entre la desviación típica de las zonas fluviales de referencia ( $SR_{iq}$ );  $M_{iq} = (R_i - MR_{ijq})/SR_{iq}$ . Posteriormente estas métricas se acotan entre 0 y 1 según unos umbrales mínimos ( $\text{Min}(M_{iq})$ ) y máximos ( $\text{Max}(M_{iq})$ ) establecidos en cada zona (BADA et al. 2009):

$$M_{ie} = (M_{iq} - \text{Min}(M_{iq})) / (\text{Max}(M_{iq}) - \text{Min}(M_{iq}))$$

Finalmente, la aplicación proporciona las cuatro métricas finales ( $M_{HINTOL}$ ,  $M_{O2INTOL}$ ,  $M_{RHPAR}$ ,  $M_{LITH}$ ), los índices SFI y CFI, el estatus ecológico del tramo de río, y un conjunto de condicionantes y limitantes asociados al método utilizado (BADA et al., 2009).

### Aplicación de EFI+ a la cuenca del tajo

Si bien EFI+ es una metodología concebida para su aplicación dentro de la DMA en un contexto paneuropeo, también es importante conocer su comportamiento en ámbitos regionales. Para analizar el comportamiento regional de la metodología EFI+ se ha aplicado en 66 nuevos puntos (denominados NoFIDES) de la cuenca española del río Tajo y los resultados han sido comparados con los obtenidos en los 22 puntos (denominados FIDES) utilizados en la construcción de las métricas EFI+ (Figura 2).

Primeramente se calculó el coeficiente de Spearman entre los índices EFI+ y el índice global de calidad del agua de cinco categorías (COMISIÓN EUROPEA, 2000) en los sitios de

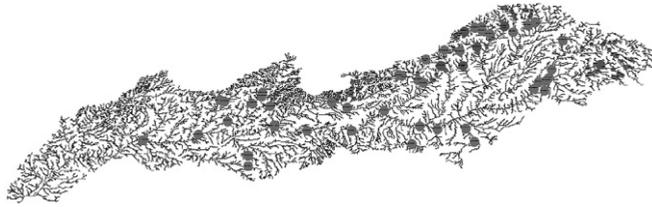


Figura 2. Puntos de muestreo en la cuenca del Tajo

menor riesgo de clasificación errónea (BADY et al., 2009), estos están localizados en las zonas de ciprínidos donde la proporción de salmónidos es menor al 20% y en las zonas de salmónidos donde su densidad relativa es mayor al 80%.

Posteriormente en estos 67 puntos de alta calidad global de las aguas también se realizó un análisis de homogeneidad de los índices EFI+ comparando los grupos FIDES y NoFIDES.

Finalmente, para ver el efecto de la zonación en bio-regiones (SEGURADO et al., 2009) y tramos fluviales (MELCHER et al., 2007), se comparó el coeficiente de correlación de Spearman entre el índice de calidad global del agua y las métricas EFI+ antes ( $R_i$ ) y después ( $M_i$ ) de efectuarse la rectificación por bioregiones y zonas fluviales.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Como resultado se obtuvo que en la zona de buena clasificación para ciprínidos, en el grupo FIDES ninguna de las cuatro métricas tuvo correlación significativa con la calidad del agua, sin embargo en los nuevos muestreos NoFIDES tanto HINTOL ( $r=0,53$ ) como el índice de salmónidos SFI ( $r=0,45$ ) tuvieron alta correlación significativa ( $p<0,05$ ). Para la zona de buena clasificación de salmónidos, en el grupo FIDES se obtuvieron buenos coeficientes de correlación con las métricas HINTOL ( $r=0,86$ ) y RHPAR ( $r=0,77$ ), sin embargo en el grupo NoFIDES no hubo ninguna métrica con correlación significativa.

En el análisis paramétrico de homogeneidad realizado en los sitios de alta calidad global del agua, se obtuvo que tres de las cuatro distancias Pearson ( $R_{O2INTOL}$ ,  $R_{RHPAR}$ ,  $R_{LITH}$ ) presentaron diferencias significativas (ANOVA,  $p<0,05$ ) entre grupos (FIDES y NoFIDES). El análisis de homogeneidad no paramétrico también encontró

diferencias significativas entre los grupos FIDES y NoFIDES (Test de Mann-Whitney,  $p<0,05$ ); así en el grupo FIDES la mediana  $R_{O2INTOL}$  fue 3,5 veces mayor que en el grupo NoFIDES, y la mediana  $R_{HINTOL}$  del grupo FIDES fue 21 veces mayor que en NoFIDES.

En el análisis del efecto de la zonación regional y fluvial, en el grupo FIDES la estandarización zonal escasamente mejoró los raquíticos coeficientes de correlación de Spearman; así, en HINTOL pasó de  $-0,08$  a  $-0,16$ , en  $O2INTOL$  de  $-0,09$  a  $-0,15$ , en RHPAR de  $-0,06$  a  $0,06$ , y en LITH de  $-0,121$  a  $-0,128$ . Sin embargo en el grupo NoFIDES empeoraron las métricas del índice de salmónidos (SFI), y las del índice de ciprínidos (CFI) se movieron entorno a la independencia; así, en HINTOL empeoró de  $-0,43$  a  $-0,29$ , en  $O2INTOL$  de  $-0,31$  a  $-0,28$ , en RHPAR pasó de  $-0,04$  a  $0,07$ , y en LITH de  $-0,07$  a  $-0,05$ .

Dado que los resultados obtenidos en el grupo FIDES, datos utilizados para la construcción de los modelos de referencia, no fueron los que cabía esperar, se chequeó el comportamiento de los residuos de los modelos GLM en los puntos de alta calidad global de las aguas. En estos análisis se encontró que existen correlaciones significativas ( $p<0,05$ ) entre la longitud y la distancia Pearson de  $O2INTOL$  ( $R_{O2INTOL}$ ), la altitud y  $R_{HINTOL}$ , la altitud y  $R_{O2INTOL}$ , la distancia al nacimiento y  $R_{RHPAR}$  y el ancho del lecho y  $R_{LITH}$ . En consecuencia, si los puntos de alta calidad hídrica fueran considerados como puntos de referencia, los resultados anteriores indicarían que existe una asociación entre los residuos de los modelos y las variables geográficas de entrada, lo que viola un supuesto básico de los modelos lineales. Además, se ha obtenido que las métricas  $M_{HINTOL}$  y  $M_{O2INTOL}$  en FIDES están asociadas fuertemente a la altitud y latitud del sitio, pudiéndose construir sendos modelos cuadráticos con significativos

coeficientes de determinación, HINTOL ( $r^2=0,68$ ) y O2INTOL ( $r^2=0,43$ ). De lo obtenido, se concluye que las métricas conservan un porcentaje significativo de información geográfica que lógicamente tiene efectos en la evaluación del estatus ecológico del tramo de río.

Se considera que la división en dos diferentes tipos climáticos mediterráneos (SEGURADO et al., 2009), no contemplada en estudios previos (ILLIES, 1967; PONT et al., 2006; SCHMUTZ et al., 2007) ha complicado la regionalización; así, se ha constatado que en 15 de los 50 ríos de la cuenca del Tajo, en tramos fluviales de longitudes inferiores a 30 kilómetros se cambia tres veces de bioregión. Sin embargo, no parece haber mejorado sustancialmente el poder discriminante de los índices EFI+ dentro de la cuenca del Tajo. Por otra parte, se considera que en ríos con fuertes gradientes de altitud y abundante aporte subterráneo, como los mediterráneos ibéricos, las variables térmicas atmosféricas utilizadas en la regionalización (SEGURADO et al., 2009) y las del agua del río pueden presentar patrones de comportamiento diferentes.

En resumen, los resultados obtenidos muestran que las cuatro métricas EFI+ están correlacionadas con la degradación, pero no con el grado de asociación que se esperaba. Por otra parte, en la zona estudiada, las cuatro métricas parecen ser útiles indicadores con indiferencia de la clasificación en zonas fluviales (ciprínidos o salmónidos). Particularmente, el buen comportamiento obtenido por la variable HINTOL (densidad de individuos menores a 15 cm de especies intolerantes a la degradación del hábitat) y de sus métricas asociadas dirige la mejora de los indicadores del estatus ecológico en entornos mediterráneos hacia métricas asociadas al tamaño de los peces (LOGEZ & PONT, 2011). Por último, el mejor comportamiento de las distancias Pearson antes de la estandarización zonal que después de esta, es un claro indicio de que la zonación y bioregiones aplicadas actualmente en EFI+ es no son suficientemente eficaces.

## CONCLUSION

EFI+ es una buena metodología para estimar y comparar la calidad de los ríos europeos den-

tro de un marco geográfico amplio. Sin embargo, en la aplicación de EFI+ en cuenca del río Tajo se han observado ciertas ineficiencias en el método, generalmente vinculadas con la zonificación geográfica, que afectan negativamente al poder discriminante de los indicadores EFI+. En consecuencia, se considera apropiado un nuevo replanteo de la regionalización y zonación fluvial en las cuencas mediterráneas ibéricas similares a la del río Tajo, cara a mejorar la utilidad de la metodología EFI+ en el marco de la DMA.

## Agradecimientos

El presente trabajo está basado en los resultados obtenidos por el proyecto EFI+, financiado por el Sexto Programa Marco de la Unión Europea (FP6-2005-SSP-5-A).

## BIBLIOGRAFIA

- BADY, P.; PONT, D.; LOGEZ, M. & VESLOT, J.; 2009. *Fish index development. EFI+ Work package 4*. <http://efi-plus.boku.ac.at>
- COMISION EUROPEA; 2000. Directiva 2000/60/EC de 23 de Octubre por la que se establece un marco para la acción comunitaria en material de aguas. *C.E. D.O.* 327:1-3 (de 22/12/2000).
- EFI+ CONSORTIUM; 2009. *Manual for the application of the new European Fish Index EFI+*. *A fish-based method to assess the ecological status of European running waters in support of the Water Framework Directive*. June 2009. <http://efi-plus.boku.ac.at>
- ILLIES, J.; 1967. *Limnofauna europaea*. Ed. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart.
- MCCULLAGH, P. & NELDER, J.A.; 1989. *Generalized Linear Models*, second edition. Ed. Chapman & Hall/CRC. London.
- MELCHER, A.; SCHMUTZ, S.; HAIDVOGL, G. & MODER, K.; 2007. Spatially based methods to assess the ecological status of European fish assemblage types. *Fisheries Management and Ecology* 14: 453-463.
- LOGEZ, M. & PONT, D.; 2011. Development of metrics based on fish body size and species traits to assess European coldwater streams. *Ecological Indicators* 11: 1204-1215

- PONT, D.; HUGUENY, B.; BEIER, U.; GOFFAUX, D.; MELCHER, A.; NOBLE, R.; ROGERS, C.; ROSET, N. & SCHMUTZ, S.; 2006. Assessing river biotic condition at a continental scale: a European approach using functional metrics and fish assemblages. *J. Appl. Ecol.* 43(1): 70-80
- PONT, D.; HUGUENY, B. & ROGERS, C.; 2007. Development of a fish-based index for the assessment of river health in Europe: the European Fish Index. *Fisheries Management and Ecology* 14(6): 427-439
- R DEVELOPMENT CORE TEAM; 2008. R: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Wien
- SEGURADO, P.; FERREIRA, M.T.; PINHEIRO, P. & SANTOS, J.M.; 2009. *Mediterranean river assessment testing the response of guild-based metric*. *EFI+ Work package 3*. <http://efi-plus.boku.ac.at>
- SCHMUTZ, S.; BEIER, U.; BOHMER, J.; BREINE, J.; CAIOLA, N.; FERREIRA, M.T.; FRANGEZ, C.; GOFFAUX, D.; GRENOILLET, G.; HAIDVOGL, G.; DE LEEUW, J.; MELCHER, A.; NOBLE, R.A.; OLIVEIRA, J.; ROSET N.; SIMOENS I.; SOSTOA, A. & VIRBICKAS, T.; 2007. Spatially-based assessment of the ecological status in European ecoregions. *Fisheries Management and Ecology* 4: 441-452.