

Una historia con ciencia, sal y aventura: ¿Cómo responden los ecosistemas frente al estrés?

Cayetano Gutiérrez Cánovas

School of Biosciences, Cardiff University, Reino Unido

GutierrezcanovasC@cardiff.ac.uk

HACE MUCHO TIEMPO, EN UNA GALAXIA NO TAN LEJANA

Todavía recuerdo con profunda emoción el día que me concedieron una, de las ya entonces escasas, becas-contrato predoctorales que financiaba la Fundación Séneca. Fue una alegría enorme y, desde luego, el principio de una gran aventura. Por aquel entonces, ni me podía imaginar las grandes experiencias que vendrían, los retos, las personas que conocería o los momentos difíciles y gloriosos en los que me vería envuelto. Sin duda, la tesis es un gran viaje en el que se sabe dónde se empieza pero nunca dónde vas a acabar.

Aunque mi colaboración con el grupo de Ecología Acuática empezó años atrás, a partir de este momento nos adentramos en una tesis con el noble objetivo de estudiar la ecología de unos ríos muy particulares: los ríos salinos (Figura 1b, f, g). Estos cuerpos de agua se salinizan de forma natural al discurrir por cuencas con un alto contenido en sales, procedentes de antiguas invasiones marinas (el mar cubrió la mitad oriental de la península ibérica en varias ocasiones, hace millones de años, dejando grandes cantidades de sal tras su retirada).

En esos momentos intuíamos que estos ecosistemas podrían mostrar unas características ecológicas muy particulares en respuesta al “estrés natural” causado por la salinidad, en comparación con los patrones ecológicos que observamos en ríos de agua dulce (Figura 1a). Los retos iniciales consistían en caracterizar las comunidades de organismos que viven en los ríos salinos ibéricos, con especial énfasis en el diverso grupo compuesto por los invertebrados (pequeños insectos, moluscos, crustáceos, etc.), para identificar las principales amenazas y crear una herramienta para determinar su estado de salud. En la Figura 1 (c, d y e) vemos ejemplos de invertebrados de agua dulce, mientras que en la Figura 2 observamos un especialista salino.

Aunque hablaré fundamentalmente de ciencia -como medio-, la finalidad de esta historia es mostrar la belleza que encierra el proceso de aprendizaje y mutación que sufrimos durante la tesis: romper las barreras de lo establecido, mirar

más allá del horizonte y comenzar a apreciar la incertidumbre y la libertad que conlleva un guion en blanco. Épicas batallas contra todo y contra uno mismo, en la que algunas personas luchan por ganar, y otras por disfrutar, inspirar o ser recordadas.

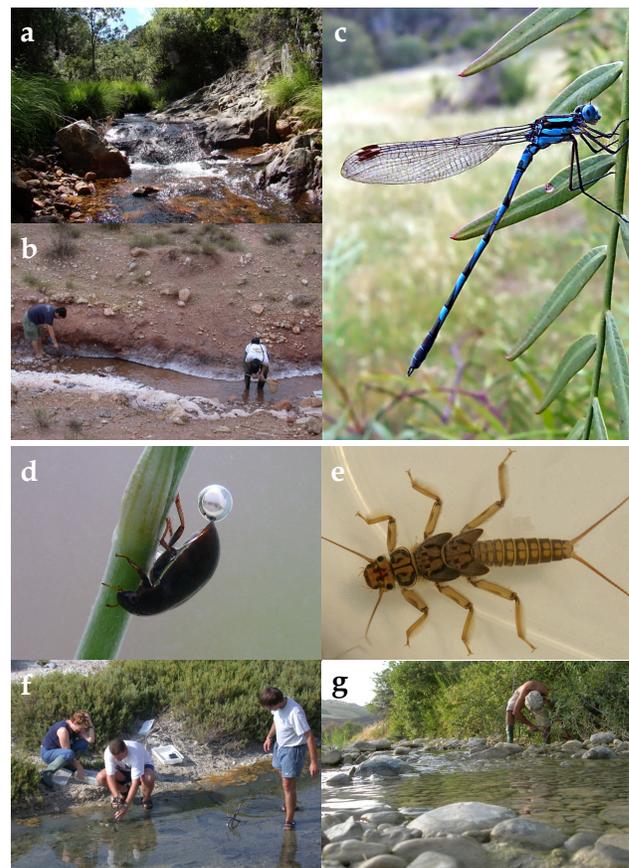


Figura 1. Los ríos ofrecen una gran variabilidad ambiental y albergan una importante fracción de biodiversidad. (a) Río Estena, agua dulce, condiciones inalteradas (Foto: Ecología Acuática, UMU), (b) Rambla Salada de Minglanilla, con alto nivel de estrés por salinidad (Foto: Ecología Acuática, UMU), (c) adulto volador de caballito del diablo (Foto: www.flagstaffotos.com.au), (d) Coleóptero acuático (Foto: J. Arribas), (e) larva acuática de plecóptero (Foto: B. Friedrich), (f) instalando un medidor de oxígeno en la Rambla Salada de Fortuna (Foto: Ecología Acuática, UMU) y (g) muestreo de macroinvertebrados acuáticos (Foto: Ecología Acuática, UMU).



Figura 2. El escarabajo de la sal (*Ochthebius glaber*) es un claro ejemplo de especialista salino (Foto: Ecología Acuática, UMU).

ADEMÁS DEL DOCTORANDO, LA NATURALEZA TAMBIÉN SE ESTRESA

Cuando pensamos en estrés nos vienen a la cabeza conceptos que varían desde las molestias o la incomodidad, hasta el dolor, las enfermedades o incluso la muerte. Además, la sensación de estrés suele llevar asociada la persistencia en el tiempo. En términos ecológicos, el concepto de estrés se puede definir como las condiciones que, excediendo el rango habitual experimentado por los organismos, pueden causar desde pequeños cambios de comportamiento, a daños biológicos irreversibles.

Existen numerosos ejemplos de estrés ecológico que surgen o aumentan en magnitud debido a la actividad humana, como la contaminación por metales pesados, los pesticidas, la lluvia ácida, el cambio climático o las especies invasoras (Figura 2 e-h). Sin embargo, también existen factores estresantes de origen natural, como hemos explicado antes. Además de la salinidad, el frío polar, las grandes altitudes o la aridez de los desiertos serían buenos ejemplos (Figura 2 a-d).

La gran diferencia entre ambos tipos de estrés reside en su persistencia histórica y, en consecuencia, en el grado en que los organismos están adaptados al factor estresante (capacidad para hacer frente a las condiciones desfavorables que provoca). El estrés de origen natural ha persistido en la Tierra durante millones de años permitiendo que ciertos organismos especialistas pudieran desarrollar las adaptaciones necesarias para sobrevivir y reproducirse en estos medios, a través de la evolución. Como ejemplo sencillo, observamos que en regiones áridas las plantas tienen hojas y mecanismos fotosintéticos adaptados para

minimizar la pérdida de agua. En cambio, el estrés de origen humano impone condiciones nuevas para los organismos que, normalmente, causan la desaparición o el desplazamiento a zonas con condiciones más propicias. De ahí que estemos sufriendo una dramática pérdida de especies conforme modificamos la naturaleza.



Figura 2. Ecosistemas estresados de forma natural (a-d) y debido a la actividad humana (e-h). (a) Alta montaña en el Himalaya (Foto: P. Novak), (b) aridez extrema en el río Indo (Foto: S. Bhardwaj), (c) fuente hidrotermal en el Atlántico (Foto: P. Rona), (d) tundra en Groenlandia (Foto: H. Grobe), (e) agricultura intensiva en invernadero (Foto: Adalme), (f) residuos en la costa (Foto: N. Ally), (g) deforestación (Foto: J. Dwyer) y (h) contaminación de las aguas (Foto: A. Rio Brazil).

Conviene recordar que la salinidad es un caso curioso de estrés. Si tenemos en cuenta que la vida procede del mar, que es un medio salino nos podríamos preguntar por qué la salinidad supondría un problema para los organismos acuáticos continentales (aquellos que viven en ríos o lagos). Cuando la vida empezó a colonizar los medios terrestres encontró que algunas sales esenciales (sodio, potasio) eran mucho más escasas que en el mar. Las plantas y animales que se adaptaron a la vida en medios terrestres o en agua dulce tuvieron que optimizar sus mecanismos fisiológicos para captar y retener al máximo estas valiosas sales. Por este motivo, la exposición a una salinidad elevada les lleva a incrementar en exceso la concentración interna de sales

pudiendo enfermar o incluso morir. De hecho, sólo un reducido grupo de organismos es capaz de completar su ciclo vital en medios salinos continentales, gracias a mecanismos especializados de tolerancia a la sal y/o expulsión activa de iones, y retención de agua, que han desarrollado durante su adaptación evolutiva.

LA PARADOJA DEL PACIENTE “FELIZMENTE ESTRESADO”

Del mismo modo que los profesionales de la medicina controlan variables clave para evaluar la salud de un paciente, los ecólogos usan una serie de indicadores para diagnosticar la integridad de un ecosistema. De manera general, se suele considerar que un sistema sano, prístino y diverso irá perdiendo especies conforme se someta a condiciones estresantes. En este caso, las medidas de diversidad serían indicadores muy útiles pues su descenso indicaría la degradación del ecosistema. Sin embargo, los ríos salinos, al igual que otros sistemas que están estresados de forma natural, muestran una diversidad baja de manera habitual, debido a que sólo unos pocos especialistas son capaces de vivir en esas condiciones tan duras. Así, paradójicamente, en las primeras investigaciones empezamos a detectar aumentos de diversidad en los ríos salinos más afectados por la agricultura y el desarrollo urbanístico, en comparación con aquellos ríos que estaban rodeados por entornos más naturales. Las primeras hipótesis apuntaban a que el descenso de salinidad favorecía la entrada de organismos de carácter oportunista, que podrían estar desplazando a los especialistas salinos debido a una mayor capacidad para competir por recursos y hábitat. Por estas razones comenzamos a testar la utilidad de nuevos indicadores de estado ecológico, que fueran independientes de la diversidad de especies y que tuvieran potencial para detectar cambios en el ecosistema.

Los científicos tenemos la costumbre de buscar el lado positivo de algunas desgracias. Por ejemplo, cuando ocurre un desastre natural o una perturbación en un sistema, intentamos usar este evento como un gran experimento en condiciones reales. En nuestro caso, estábamos trabajando en la Rambla Salada de Fortuna (todavía era alumno interno) cuando este entorno protegido (Paisaje Protegido de Ajauque y Rambla Salada) empezó a registrar entradas de agua dulce procedentes de la rotura del canal del Trasvase Tajo-Segura, que cruza literalmente la rambla. Durante el año 2003, debido a estas pérdidas, se registraron enormes descensos de salinidad que no se recuperaron hasta principios de 2004. Esta situación propició un experimento natural excepcional donde evaluamos una serie de indicadores que nos permitieran detectar el proceso de “dulcificación” de una rambla salina. Como resultado principal observamos que la biomasa del biofilm (conjunto de bacterias, diatomeas y

hongos microscópicos que recubren el lecho del río) es un indicador útil, ya que disminuye significativamente tras la dulcificación puntual (de corta duración). En cambio, cuando los procesos de dulcificación se vuelven crónicos, observamos un descenso dramático de producción primaria, biomasa total de productores primarios e invertebrados, que podrían tener consecuencias devastadoras para las aves que se alimentan de estos ríos. Estos resultados podrían ser útiles para mejorar la evaluación de la salud de ríos salinos y detectar situaciones en las que los medios se ven afectados por entradas de agua dulce procedente de regadíos o efluentes urbanos.

Tras estos dos estudios, ampliamos el ámbito espacial de la tesis incluyendo otros sitios del Mediterráneo. Muestreos repletos de momentos inolvidables en paisajes remotos y de extrema belleza (Figura 3). Muestreamos ríos salinos ibéricos desde el sureste de Andalucía hasta Navarra. También, ríos salinos marroquíes hasta llegar al Sahara. Finalmente, visité Sicilia, donde realicé una estancia de tres meses (Universidad de Palermo) que fue especial para mí por varios motivos. Era la primera vez que me iba a la aventura a un país desconocido, nuevo idioma y toda una campaña de muestreos por organizar. Las estancias pueden cambiar el rumbo de una tesis y hacerte crecer como persona e investigador.



Figura 3. Fotos tomadas durante los muestreos de ríos salinos en Marruecos junto al equipo de investigadores de la Universidad Abdelmalek Essaadi de Tetuán (primaveras de 2007 y 2008). Fotos: Ecología Acuática, UMU.

Fue una tarde en Palermo donde surgió la idea de comparar los patrones de biodiversidad a lo largo del enorme gradiente de salinidad que encontramos en ríos del Mediterráneo occidental (ríos de agua dulce con apenas unos miligramos de sales disueltas hasta ríos donde las sales se concentran hasta alcanzar varias veces la salinidad que encontramos en el mar). En unas semanas, junto a los datos sobre ríos salinos ibéricos, marroquíes y sicilianos, logramos recopilar una gran cantidad de información sobre ríos de agua dulce de las mismas regiones (Figura 4), tras contactar con investigadores marroquíes y sicilianos que se mostraron entusiasmados con la idea del estudio. Por supuesto, también agradecemos a los investigadores del proyecto GUADALMED la generosidad con la que pusieron sus datos a disposición pública.

Tras unos años de estudio, logramos producir una clasificación de ríos que pudiera diferenciar entre los distintos tipos de ríos de agua dulce y salina, y que fuera aplicable en el ámbito mediterráneo.

Además de generar esta clasificación ampliada de ríos mediterráneos, también evaluamos en qué medida los indicadores de estado ecológico que se están usando actualmente en los ríos salinos son capaces de detectar las presiones humanas. Los resultados demostraron que ninguna de las herramientas empleadas actualmente para aplicar la Directiva Marco de Agua (legislación europea en materia de aguas) es capaz de detectar la degradación de los ríos salinos.

En cambio, demostramos como algunos indicadores alternativos, basados en la presencia de taxones especializados en medios salinos, responden mejor ante dichas presiones y podrían servir de base para futuros índices que evalúen el estado ecológico de los ríos salinos mediterráneos.

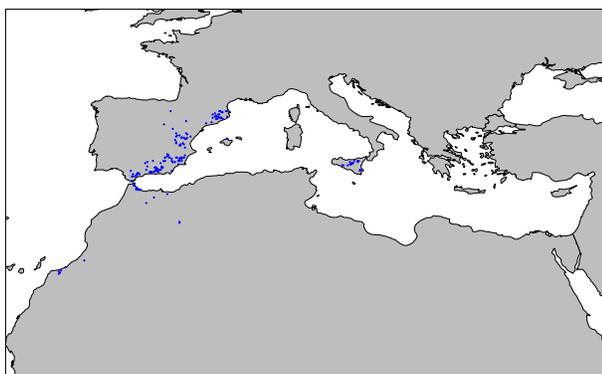


Figura 4. Localidades de muestreo usadas en la clasificación de los ríos mediterráneos en el Mediterráneo occidental (este ibérico, noreste y suroeste marroquí y Sicilia central).

Este trabajo podría tener implicaciones importantes en la evaluación y gestión de los ríos mediterráneos, proporcionando una herramienta sencilla, automática y basada en variables espaciales de fácil obtención (por ejemplo, salinidad del agua, geología, altitud, variables climáticas, etc.).

MÁS VALE PREVENIR QUE CURAR: LA ECOLOGÍA PREDICTIVA

En los siguientes años, realicé otras dos estancias que cambiaron mi manera de concebir la ecología, permitiendo terminar la tesis con una perspectiva muy distinta a la inicial.

En la primera estancia en la Universidad de Cardiff, estudiamos si los factores estresantes de origen natural y humano tienen efectos distintos en la biodiversidad. Para ello, usamos los ríos como sistema y los invertebrados acuáticos como modelos para el estudio del efecto del estrés en la biodiversidad. Es imprescindible destacar el cambio de paradigma que supone usar los ríos como foco del estudio a usarlos como un sistema modelo que nos permitiera formular preguntas de interés general en ecología, aplicables a cualquier ecosistema u organismo.

Para representar el estrés de origen natural tomamos un subconjunto de muestras de ríos salinos del sur y sureste ibérico. También recopilamos muestras de un gradiente de altitud en la región del Himalaya Menor (Nepal). Como ejemplos de estrés de origen humano recopilamos información acerca de tres tipos de contaminantes: lluvia ácida (Gales, Gran Bretaña) y metales pesados procedentes de la minería (Gales y suroeste Inglaterra, Gran Bretaña) e intensificación agrícola y urbana (sur y sureste ibérico).

Los resultados de este trabajo mostraron que todos los factores estresantes disminuyen el número de organismos que son capaces de vivir en estas condiciones (reducción de la diversidad de especies). Sin embargo, los cambios en la composición de especies en respuesta al estrés se producen de manera muy distinta, según se trate de estrés de origen natural o humano. A lo largo de los gradientes de estrés natural (salinidad y altitud, figura 5a), las especies se reemplazan de tal manera que los sitios con bajo nivel de estrés presentan unas especies totalmente distintas a las que aparecen en sitios estresados (siguiendo el ejemplo de la Figura 5a, las especies 1-4 sólo están presentes en el sitio de menor estrés, mientras que la especie 10 sólo aparece cuando el estrés es muy intenso).

Sin embargo, a lo largo de los gradientes de estrés humano (acidez, metales pesados e intensificación de agricultura y urbanismo, Figura 5b), la presión que sufren las

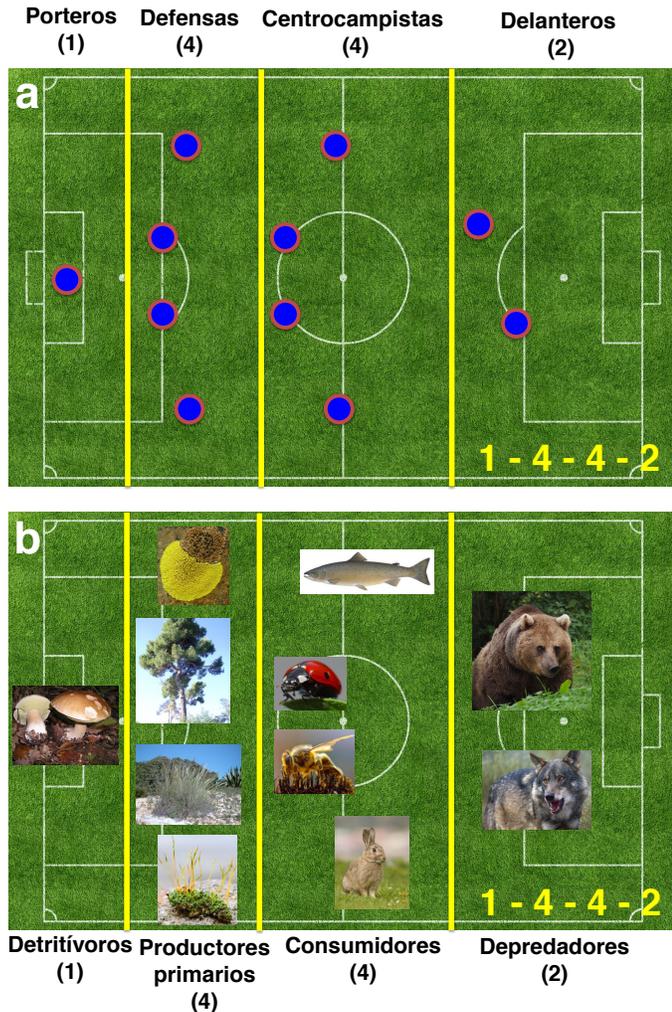


Figura 6. Comparación entre el funcionamiento de dos sistemas: un equipo de fútbol (a) y un ecosistema natural (b). Fotografías del ecosistema natural: *Boletus edulis* (Autor: Strobilomyces), musgo (B. Blaylock), esparto (C. Niehaus), pino carrasco (Accurimbono), líquen (J. Hollinger), abeja (Jon Sullivan), mariquita (libre), conejo (J.J. Harrison), salmón (T. Knepp), lobo ibérico (A. de Frías Marqués) y oso pardo (F.C. Franklin).

Los ecosistemas funcionan de una manera similar a la de un equipo de fútbol (Figura 6b). Cada especie juega un papel distinto, aunque algunas contribuyan de manera similar al funcionamiento del ecosistema. Del mismo modo, algunos grupos funcionales están más representados que otros (son más redundantes). Además, las especies interactúan existiendo una interdependencia que afecta a los procesos resultantes.

De una manera análoga, podríamos predecir más fácilmente qué consecuencias tendría la extinción de una especie, si consideramos las funciones que realiza y su interacción con el resto de especies (por ejemplo, si el conejo

desaparece de una zona, muchos depredadores morirán debido a la falta de la presas).

Ciertamente, resulta mucho más útil e informativo analizar un ecosistema desde el punto de vista de las funciones que desempeñan los organismos, que desde el punto de vista taxonómico.

Regresando al estudio en cuestión, para analizar cómo respondían las características funcionales de los ecosistemas frente al estrés, volvimos a usar el gradiente de salinidad como ejemplo de estrés natural y la intensificación en agricultura y urbanismo como ejemplos de estrés de origen humano. El resultado más destacable fue que las características funcionales que estimamos respondieron de manera similar frente al estrés, independientemente del tipo de analizado. Conforme aumentaba el estrés, las comunidades se volvían menos diversas, menos redundantes, más homogéneas y con una mayor proporción de generalistas funcionales.

Los resultados de este trabajo nos podrían ayudar a mejorar la predicción de la respuesta de los ecosistemas al estrés producido por la actividad humana. El hecho de que el estrés reciente (de origen humano) genere patrones similares al que ha persistido a escala histórica, nos muestra que los ecosistemas estresados limitan de forma activa ciertas formas biológicas que serían las más sensibles. Las funciones asociadas a este tipo de especies serían las más sensibles a la perturbación humana.

“ADELANTE, BONAPARTE”

Tras unos maravillosos años en Murcia como “casa”, y con el mundo como “patio”, se acabó la tesis. Una etapa tan grande que hace que cualquier otra época se lo tenga que “currar” mucho para competir en intensidad y buenos momentos para ser merecidamente recordada. Con el tiempo, mi sensación es que lo mejor que se puede sacar de la tesis es el aprendizaje y la transformación que supone enfrentarse a un reto que nadie había resuelto antes (en esta asignatura no hay libro de respuestas), además de las experiencias y el crecimiento personal que conlleva este mundo de aventuras e incertidumbres. Si al final se publica algún artículo, y encima se hace en buenas revistas, es casi un regalo. O casi un milagro, teniendo en cuenta la situación general de las universidades españolas.

“Me voy a inventar un plan, para escapar, hacia adelante”. Quizás este estribillo del grupo catalán Standstill resume en gran medida lo que es la vida postdoctoral actual. A partir de aquí, y cuando creías que todo lo “malo” había terminado, comienza otra carrera de rumbo todavía más incierto. Al principio, como cualquier situación nueva, te saca

de tu zona de confort: si no encuentras una postdoc pronto, te sientes mal porque piensas que es el fin del mundo, que has tirado 5 o 6 años a la basura y que eres un inútil; si la encuentras pronto, no tienes tiempo ni de disfrutar de un par de meses relajados, te tienes que marchar rápidamente, dejar todo atrás y adaptarte a un nuevo sitio donde la gente seguramente será más fría, no entenderán tus chistes y te harán pensar que has perdido tus habilidades sociales. Tranquilidad señoras y señores: a pesar de este panorama aparentemente sombrío y deprimente, en unos meses, todo se transforma en una nueva etapa con nuevos escenarios, personajes y bonitas historias. El show debe continuar.

Seguramente si muchas personas que hoy ostentan cargos de poder- académicos, políticos o empresariales - , hubieran vivido experiencias tan bonitas y enriquecedoras, probablemente viviríamos en un mundo mejor. Esta vida te mantiene joven, ligero de equipaje y adaptativo, apartado del sedentarismo conformista y cercano a un cazador-recolector que vive sin hacer grandes planes, con más ganas de querer que de odiar, pero disfrutando de los regalos que se van presentando. Bien entendida, esta vida es un privilegio.

Pese a lo bonito de la experiencia individual que hemos disfrutado, la sociedad debería reflexionar si le merece la pena seguir invirtiendo en investigación como lo ha hecho hasta el momento. Desde la perspectiva del investigador, la estrategia actual parece ciertamente hipócrita, particularmente en aquellas disciplinas que crean valor intangible o con un impacto social a medio o largo plazo, como es el caso de biología básica, la ecología o las humanidades.

La sensación que queda conforme un investigador va generando resultados, es que no existe una intención por parte de la sociedad de integrar y asimilar el conocimiento generado. Por ejemplo, ¿existe una intención de mejorar la gestión de la naturaleza en función de la mejor ciencia disponible? ¿a qué velocidad se incorpora el nuevo conocimiento científico en los programas educativos? ¿hay alguna intención de aprovechar a los investigadores formados o simplemente se hace por quedar bien diciendo que se han gastado unos cuantos millones de euros en investigación? A veces queda ese regustillo amargo de estar dando lo mejor para resolver un problema importante, sin que exista un canal de intercambio con la sociedad. Mientras, seguimos cegados en publicar en revistas con bajo impacto social (curiosamente, llamadas revistas de impacto - SCI) y desconociendo si se avanza por el camino correcto y al ritmo adecuado.

En los próximos años atravesaremos momentos complicados, en los que la acción conjunta del cambio

climático, el agotamiento de recursos y el aumento de la población mundial causarán problemas sin precedentes, conllevando, en última instancia, el colapso de nuestro modelo de civilización. Normalmente, un problema no se puede solucionar aplicando la misma receta que lo ha generado. La investigación, en general, y particularmente la ecología, nos ofrecen un acercamiento a visiones y modelos distintos en cuanto al análisis de sistemas. En especial, los estudiosos de la biología y la naturaleza tenemos el privilegio de trabajar con sistemas que han persistido durante millones de años, ofreciendo el resultado de la mejor adaptación posible al amplio rango de condiciones que existen en nuestro planeta, desde las más estresantes y áridas, hasta las más benignas. Señoras y señores, aprendamos de la naturaleza a hacer un mundo mejor, aprovechemos que hay muchos investigadores con ganas de explorar más allá del horizonte y compartir su botín con la sociedad.

REFERENCIAS

- Arribas, P., Gutiérrez-Cánovas, C., Abellán, P., Sánchez-Fernández, D., Picazo, F., Velasco, J., Millán, A. (2009). Tipificación de los ríos salinos ibéricos. *Ecosistemas*, 18, 1-13.
- Gutiérrez-Cánovas, C., Hernández, J., Velasco, J. y Millán, A. (2012). Impact of chronic and pulse dilution disturbances on metabolism and trophic structure in a saline Mediterranean stream. *Hydrobiologia*, 686, 225-239.
- Gutiérrez-Cánovas, C., Millán, A., Velasco, J., Vaughan, I.P. y Ormerod, S.J. (2013). Contrasting effects of natural and anthropogenic stressors on beta-diversity in river organisms. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 796-805.
- Gutiérrez-Cánovas, C., Sánchez-Fernández, D., Velasco, J., Millán, A. y Bonada, N. (2015). Similarity in the difference: changes in community functional features along natural and anthropogenic stress gradients. *Ecology*, 96, 2458-2466.
- Gutiérrez-Cánovas, C., Velasco, J. y Millán, A. (2008). SALINDEX: A macroinvertebrate index for assessing the ecological status of saline "ramblas" from SE of the Iberian Peninsula. *Limnetica*, 27, 299-316.
- Gutiérrez-Cánovas, C., Velasco, J. y Millán, A. (2009). Effects of dilution stress on the functioning of a saline Mediterranean stream. *Hydrobiologia*, 619, 119-132.
- Millán, A., Velasco, J., Gutiérrez-Cánovas, C., Arribas, P., Picazo, F., Sánchez-Fernández, D., Abellán, P. (2011). Mediterranean saline streams in southeast Spain: What do we know? *Journal of Arid Environments*, 75: 1352-1359.
- Velasco, J., Millán, A., Hernández, J., Gutiérrez, C., Sánchez, D., Abellán, P. y Ruíz, M. (2006). Response of biotic communities to salinity changes in a Mediterranean hypersaline stream. *Saline Systems*, 12, 1-15.