

ENCUENTROS EN LA BIOLOGÍA



Director:
Salvador Guirado

Editor jefe:
M. Gonzalo Claros

Comité editorial:
Ramón Muñoz-Chápuli,
Antonio de Vicente,
José Carlos Dávila,
Francisco Cánovas,
Francisca Sánchez

Diseño de la portada:
M. Gonzalo Claros

Correspondencia a:
Encuentros en la Biología,
M. Gonzalo Claros (Editor jefe),
Depto. Biología Molecular y Biquímica,
Facultad de Ciencias,
29071 Málaga
Tfno.: 952 13 7284
email: claros@uma.es

Dirección de internet:
<http://www.encuentros.uma.es/>

Editado con la financiación del
Vicerrectorado de Investigación y
Doctorado de la Universidad de Málaga.

D.L.:MA-1.133/94

ÍNDICE

3 El Caballo de Troya de la especie humana

Moisés Garrido Sanchís y Marta Blasco Alonso

4 Herencia de emergencia: ¿desafío de las plantas a las leyes de Mendel?

*Daniel Pastor de la Rubia y
Jesús Navas-Castillo*

6 Breve historia de la Ecología: vicisitudes y pretensiones de una nueva ciencia (III)

José M^a Blanco Martín

Portada: Sección transversal de un tronco de pino torcido hacia la derecha, donde se observa la madera de compresión. M. G. Claros, F. R. Cantón, D. P. Villalobos y S. Díaz-Moreno. Dpto de Biología Molecular y Bioquímica, Universidad de Málaga.

Instrucciones para los autores

La revista Encuentros en la Biología es una publicación mensual durante el curso académico español que pretende difundir, de forma amena y accesible, las últimas novedades científicas que puedan interesar tanto a estudiantes como a profesores de todas las áreas de la biología. Además de la versión impresa, la revista también se puede consultar en línea en <http://www.encuentros.uma.es/>. **Cualquier persona puede publicar en ella** siempre que cumpla las siguientes normas a la hora de elaborar sus originales:

1. Todos los manuscritos deberán ser inéditos o contarán con la autorización expresa del organismo que posea los derechos de reproducción. Además, deben tener alguna relación con el objetivo de la revista —los que simplemente reflejen opiniones se rechazarán directamente—.
2. El formato del documento puede ser RTF, ODT (OpenOffice), ABW (AbiWord) o DOC (Microsoft Word). Debido a las restricciones de espacio, la extensión de los mismos no debe superar las 1600 palabras; en caso contrario, el editor se reserva el derecho de dividirlo en varias partes que aparecerán en números distintos.
3. Cada contribución constará de un título, autor o autores, y su filiación (situación académica; institución u organismo de afiliación; dirección postal completa; correo electrónico; teléfono). Para diferenciar la afiliación de diferentes autores utilice símbolos (*, #, ¶, †, ‡) después del nombre de cada autor.
4. Los nombres de las proteínas se escribirán en mayúsculas y redondilla (ABC o Abc). Los de los genes y las especies aparecerán en cursiva (ABC, *Homo sapiens*). También se pondrán en cursiva aquellos términos que se citen en un idioma que no sea el castellano.
5. Las tablas, figuras, dibujos y demás elementos gráficos serán en blanco y negro puros, y deberán ir colocados en su posición, dentro del archivo. Las figuras, las fórmulas y las tablas deberán enviarse en formato GIF o JPG, a una resolución mínima de 150 dpi, máxima de 300 dpi y al menos 8 bits de profundidad.
6. Cuando sean necesarias, las referencias bibliográficas se citarán entre paréntesis dentro del propio texto indicando el apellido del primer autor (se escribirá «y cols» en caso de ser más), el año, la revista o libro donde aparece, el volumen y las páginas.
7. Envío de contribuciones: el original se enviará por correo electrónico al editor jefe (claros@uma.es) o a cualquier otro miembro del comité editorial que consideren más afín al contenido de su contribución. Aunque lo desaconsejamos, también se pueden enviar por correo ordinario (Departamento de Biología Molecular y Bioquímica, Universidad de Málaga, 29071 Málaga, España) acompañados de un CD. No se devolverá ningún original a los autores.
8. Los trabajos los leerán al menos un editor y/o un revisor externo para asesorar sobre la conveniencia de publicar el trabajo; también se podrán sugerir al autor las mejoras formales o de contenido que harían el artículo más aprovechable. En menos de 30 días se enviará la notificación al autor por correo electrónico.

EL CABALLO DE TROYA DE LA ESPECIE HUMANA

Moisés Garrido Sanchís# y Marta Blasco Alonso\$

Ldo. en Biología, Profesor de Ciencias en el C.E.S. Sta. M^a de los Ángeles, Málaga. \$ Médico Residente de Ginecología y Obstetricia, HRU Carlos Haya, Málaga.

La aparición y la extinción de especies son realidades incuestionables que ocurren continuamente en la Naturaleza. Mientras se lee este artículo y se reflexiona sobre él, en algún rincón de la selva tropical, del desierto, de la sabana o de las profundidades del mar, se está produciendo el sorprendente proceso del nacimiento de una especie; pero, también, otra especie se extingue porque no ha logrado adaptarse a los cambios del medio en que vive. En el pasado se han producido cinco grandes extinciones, Recientemente, muchos científicos afirman que está comenzando la sexta extinción masiva y que el hombre, a través de sus actividades, está contribuyendo a ella.

Desde su origen, la especie humana ha tenido un éxito biológico innegable, pues ha superado pandemias, hambrunas, sequía, guerras y otros males. Pero, ¿está preparada para hacer frente a una amenaza, originada por ella misma y a una escala muy superior a cuantas pudo generar, con su actividad, en los milenios anteriores?

Aunque la especie humana podría extinguirse por diferentes causas externas, estas notas pretenden reflexionar sobre algunas características de la actividad humana que pueden contribuir a cambios en el medio que, por su extensión o su rapidez, sean letales para la especie. Hay indicios fehacientes en este sentido y, aunque los adelantos científicos, técnicos y sanitarios han podido resolver o «parchear» numerosos problemas hasta ahora, ¿es esto sostenible?

Se considerarán aquí tres características de la actividad humana que, al darse conjuntamente, son capaces de producir una sinergia que potencie los efectos y, cuando éstos son nocivos, aumente considerablemente su capacidad destructora.

1) **Continuidad.** Algunos fenómenos naturales, como las grandes erupciones volcánicas, pueden emitir enormes cantidades de energía y de materiales nocivos, pero su acción suele estar relativamente localizada en el espacio y, sobre todo, en el tiempo. La actividad humana es, en cambio, continua, persistente, lo que no deja apenas posibilidad de recuperación a las zonas sobre las que actúa.

2) **Diversidad.** Las distintas plantas industriales contaminan la atmósfera, los ríos, los mares y los suelos y, en ocasiones, para su funcionamiento se esquilman las reservas de materias primas, llegando incluso a su agotamiento. El enorme parque automovilístico mundial produce gases de combustión, restos de combustibles orgánicos sin quemar y residuos líquidos y sólidos. Las ciudades generan grandes cantidades de gases procedentes de la calefacción doméstica, aguas residuales y basuras. La agricultura tala los bosques, en ocasiones deseca los

suelos y, casi siempre, los contamina con plaguicidas y abonos químicos. Basten estos ejemplos para dar fe de la gran diversidad de la acción humana, que va mucho más allá de lo aquí expuesto.

3) **Extensión.** El enorme aumento de la población mundial en los dos últimos siglos ha llevado a una inmoderada expansión de las ciudades, de las áreas industriales, de las redes de comunicación, de la superficie de suelo agrario, de las zonas de caza y pesca, etc. La actividad humana no es, pues, un fenómeno más o menos localizado, sino que se extiende a toda la superficie de la Tierra, a toda la biosfera.

Lo que hace más dañina a la actividad humana es la incidencia conjunta, sinérgica, de las características descritas y lo que hace más difícil conjurar su amenaza es que el motor que la impulsa es la ambición económica. Resulta innegable que la actividad humana está ayudando a que el medio cambie en dirección perjudicial para la especie. A continuación, se consideran tres procesos que, a largo plazo, pueden ser su «talón de Aquiles».

1) **Alteraciones del ciclo celular: cáncer.** Es evidente que la tasa de aparición de cáncer en la población está aumentando. Esto puede explicarse, sólo en parte, por el aumento de la esperanza de vida, pero lo que ésta no explica es el crecimiento de la frecuencia de aparición de cáncer en sectores de población de edad cada vez menor. A estos aumentos contribuye el hombre con la producción de miles de contaminantes que emite al medio exterior o incluye en la cadena alimenticia humana. El cáncer es una de las causas de mayor morbimortalidad y, aunque una activa investigación lucha, con cierto éxito, contra él, la mortalidad sigue siendo alta y, además, los tratamientos producen frecuentemente esterilidad en quien los recibe. Este último efecto tiene especial importancia en sectores jóvenes de población, que aún no se han reproducido.

2) **Alteraciones de la microbiota intestinal.** Es bien sabido que el epitelio intestinal está recubierto por una población de bacterias que mantiene una intensa relación de simbiosis o comensalismo con el hombre y es fundamental para su vida. La microbiota actúa, colectivamente, como un órgano que mejora la biodisponibilidad de nutrientes, elimina compuestos perjudiciales, modula el sistema inmunitario y protege contra enfermedades de origen bacteriano. El modo de vida del hombre moderno, especialmente en los países desarrollados, es muy agresivo para la microbiota intestinal. Como ejemplos de acciones nocivas, considérense el abuso de ciertos medicamentos, los numerosos aditivos (conservantes, aromas, colorantes) utilizados por la industria de la alimentación, el «estrés» de la vida cotidiana, la permanencia cada vez más prolongada

en ambientes asépticos y el abandono de la fermentación de los alimentos como forma de conservación, ampliamente utilizada en el pasado y casi totalmente sustituida, desde la invención de la nevera, por la refrigeración y la congelación. Para tratar de contrarrestar los efectos de estas costumbres, se acude a productos conocidos como **probióticos** (suplementos dietéticos microbianos, como los *Lactobacillus* y *Bifidobacterium* que, ingeridos en cantidades adecuadas, pueden beneficiar al huésped más allá de su valor nutritivo) y **prebióticos** (ingredientes alimentarios no digeribles, como oligo- y polisacáridos de origen vegetal y glucoconjugados de la leche humana, que estimulan el crecimiento o la actividad de algunos microorganismos intestinales). Pero el aporte es, muchas veces, insuficiente y los productos son relativamente caros, por lo que sólo llegan a sectores de población con suficientes medios económicos.

3) **Alteraciones de la capacidad reproductora.** El éxito de una especie depende, en gran medida, de su capacidad de reproducción. Son muchos los factores que pueden mermar esta capacidad; en el caso del ser humano se destacarán aquí los dos siguientes. En primer lugar, la acción de múltiples sustancias tóxicas producidas por el hombre, que, de forma directa o indirecta, disminuyen la fertilidad del individuo. En general, pueden actuar sobre las gónadas, inhibiendo o alterando la espermatogénesis y la ovogénesis, o bien sobre los centros superiores que controlan la producción de hormonas gonadotropas. En segundo lugar, el tipo de vida, que obliga a los jóvenes a retrasar, cada vez más, la reproducción hasta edades en las que el sistema reproductor ya no es tan eficaz. Es verdad que estos dos factores son más propios de los países desarrollados pero, a medida que las técnicas implicadas y el sistema económico que condiciona el tipo de vida

se expanden, alcanzarán también a los demás países. Para tratar de resolver el problema, se han desarrollado técnicas de reproducción, como la inseminación artificial, la fecundación «in vitro» y la inyección intracitoplasmática de espermatozoides. Se trata de técnicas bastante eficaces, pero también presentan problemas. Por ejemplo, en la fecundación normal, una eyaculación emite entre 20 y 60 millones de espermatozoides y sólo uno llega a fecundar al ovocito. La presión selectiva es, pues, muy fuerte. En principio, en las técnicas antes citadas, esta selección no existe. Para imitarla, se ha introducido un procedimiento de laboratorio, denominado capacitación espermática, que consiste en la eliminación de los espermatozoides muertos o defectuosos mediante gradientes de densidad y centrifugación. Pero, toda manipulación de células puede dañarlas, riesgo que en estas técnicas no es bajo; por ejemplo, cualquier mínima variación de temperatura sufrida por el embrión durante su manipulación puede inducirle alteraciones perjudiciales y la inyección intracitoplasmática, en concreto, es muy agresiva para el ovocito. Además, se desconoce cómo pueden repercutir los posibles daños, a largo plazo, en la salud de los individuos gestados de esta manera. Por último, aunque la casuística es muy variada, estas técnicas se suelen utilizar para conseguir la reproducción de individuos que no la han logrado por vía natural, debido a defectos de movilidad espermática u otros, lo que implica un punto de partida relativamente débil para la capacitación espermática.

Conclusión. Es evidente que el ser humano trata de adaptar el medio a sus deseos de forma, muchas veces irracional y excesiva, con lo que está contribuyendo a su degradación, con el consiguiente perjuicio para la especie humana y para otras especies, a veces de forma irreversible.

HERENCIA DE EMERGENCIA: ¿DESAFÍO DE LAS PLANTAS A LAS LEYES DE MENDEL?

Daniel Pastor de la Rubia* y Jesús Navas-Castillo#

*Estudiante de la Licenciatura en Biología (Universidad de Málaga). #Profesor Asociado del Departamento de Biología Celular, Fisiología y Genética, Universidad de Málaga, y Científico Titular de la Estación Experimental «La Mayora», CSIC (Algarrobo-Costa, Málaga).

Un dogma básico de la genética mendeliana clásica es que los alelos de un gen se heredan de forma estable de una generación a la siguiente, dando lugar a una segregación predecible. Un trabajo del grupo de Robert Pruitt del Departamento de Botánica y Patología Vegetal de la Universidad de Purdue [Lolle y cols., *Nature* 434, 505-509 (2005)], parece desafiar este principio. Las observaciones iniciales que hacían sospechar de una herencia poco ortodoxa tuvieron lugar con los mutantes *HOTHEAD* (*hth*) de la planta *Arabidopsis thaliana*. Estos mutantes, recesivos, presentan una fusión anormal de los órganos florales. En la descendencia de plantas *hth/hth*, y por lo tanto con fenotipo mutante, aparecían individuos con

fenotipo normal con muy alta frecuencia, inexplicable por fenómenos conocidos como la mutación. Los experimentos llevados a cabo mostraron que estas plantas eran capaces de heredar una información genética ilocalizable en los genomas de los progenitores, pero sí en las generaciones anteriores, recuperando el gen que estaba presente en sus «abuelos» o «bisabuelos» en su estado silvestre.

El gen *HOTHEAD*, localizado en el cromosoma 1 de *A. thaliana*, codifica una proteína de la familia de las glucosametilcolina-oxidoreductasas, que está implicada en uno de los pasos de la biosíntesis de cera epicuticular. Los autores disponían de una colección de 11 mutantes homocigóticos para los alelos recesivos de este gen, con

diferentes mutaciones puntuales que los diferencian del silvestre. Tras obtener una serie de plantas homocigóticas para estas mutaciones (*hth/hth*), se comprobó que, al autofecundar estos mutantes, se obtenían con una elevada frecuencia (en torno al 10%) descendientes que no tenían la alteración fenotípica que presentaban sus progenitores, sino que eran fenotípicamente idénticos a algunos de sus ancestros. Dado que los progenitores eran homocigóticos, la aparición de plantas que revertían su fenotipo *HOTHEAD* al silvestre no podía explicarse mediante los principios de la genética mendeliana.

Inicialmente, los autores descartaron dos explicaciones triviales: la contaminación de las semillas obtenidas mediante autofecundación con semillas silvestres y la polinización cruzada de las plantas mutantes con polen silvestre. Algunas otras explicaciones convencionales fueron consideradas y descartadas. Una de ellas es que la inestabilidad génica pudiera deberse a la presencia de transposones o secuencias repetidas, pero, al analizar la secuencia del gen revertido, se comprobó que no existían secuencias de este tipo. También se descartó que un fenómeno de elevada tasa de mutación fuera el que revertiera el alelo mutante (*hth*) al silvestre (*HTH*), ya que debería dar lugar a numerosas mutaciones en otras posiciones del gen, silenciosas o no. Sin embargo, en la secuencia revertida existía un único cambio, la mutación puntual que convertía el alelo mutante (*hth*) en silvestre (*HTH*). Dada la eficacia y exactitud con el que el gen revierte al estado silvestre, cabía pensar en un mecanismo basado en una «plantilla» preexistente, una copia del gen silvestre heredado de los antepasados y que, en un momento dado, esté disponible para reemplazar la copia mutante. La pregunta que se planteaba era determinar cuál es la naturaleza y localización de esta posible copia. La búsqueda de estas copias del gen en forma de DNA mediante amplificación por PCR o hibridación molecular tipo Southern fue infructuosa: no parecía existir ninguna copia del gen «a la espera» en otra zona del genoma. Como en *A. thaliana* existe una familia de genes relacionados con *HOTHEAD*, los genes *HOTHEAD-LIKE* (*HTL*), se pensó que fueran fragmentos de éstos los que se utilizaran para restaurar el gen mutado. Cuando se compararon las secuencias de algunos de los mutantes *hth* con las de los genes *HTL*, se comprobó que algunos de los cambios necesarios para la restauración del gen silvestre no podían llevarse a cabo por este mecanismo.

Es de destacar que el fenómeno de recuperación del alelo silvestre con una frecuencia elevada se observaba no sólo para el gen *HOTHEAD*, sino también para todos los genes polimórficos que fueron analizados, pero únicamente en las plantas con el genotipo *hth/hth*.

Los autores proponen un novedoso mecanismo para explicar los fenómenos de reversión a los alelos silvestres en las plantas *hth/hth*. En estas plantas existiría un tipo de RNA estable, probablemente en forma de doble cadena, que podría replicarse y transmitirse a través de sucesivas generaciones. Este RNA podría, en determinadas circunstancias, ser capaz de modificar la secuencia de DNA

del genoma nuclear para restaurar la información genética existente en las generaciones anteriores. Aunque se trataría de un modo de herencia no sospechado con anterioridad, los autores consideran que se han descrito previamente todos los procesos necesarios para el modelo. Algunos de ellos podrían estar relacionados con los mecanismos que permiten la persistencia del silenciamiento genético post-transcripcional inducido por RNA de doble cadena a lo largo de generaciones.

En este trabajo también se especula sobre la función que este inusual mecanismo de herencia podría tener en el organismo silvestre. Una posibilidad es que proporcione una reserva de variación genética adicional a la contenida en los cromosomas. Si esta información pudiera integrarse de nuevo en el genoma en forma de DNA, podría permitir que las especies autógamias como *A. thaliana* eviten las consecuencias negativas de la autofecundación. Otra posibilidad, más llamativa, es que la herencia de la copias no genómicas de los genes tenga lugar tanto en las plantas silvestres como en las *hth/hth*, pero la frecuencia con la que se usan para modificar la secuencia genómica es más elevada en las plantas mutantes. Esta diferencia podría ser el resultado del estrés que la ausencia de la proteína codificada por el alelo silvestre causa en la planta. Podría imaginarse un mecanismo en el que cierta información alélica adicional se mantiene fuera del genoma, pero podría usarse en el caso de darse situaciones que pusieran en peligro el normal funcionamiento del organismo. La información extragenómica utilizada no se elegiría al azar, sino que estaría constituida por una «genoteca» de secuencias alélicas que habrían probado su correcta funcionalidad en los ancestros, permitiéndoles sobrevivir y dejar descendencia. El organismo podría ir haciendo «copias de seguridad» en forma de RNA de aquellos alelos que fueran funcionales en unas condiciones determinadas y la recuperación de estas secuencias por parte del genoma podría representar un mecanismo para sustituir un genotipo que estuviera poco adaptado a las nuevas condiciones ambientales.

Un fenómeno tan novedoso y llamativo como el descrito en el artículo de Lolle y cols. evidentemente desata de inmediato una controversia en el ámbito científico. Así, la misma revista *Nature* publicó dos comentarios que proponían mecanismos alternativos que explicarían el fenómeno observado. Uno de ellos recurre a la posibilidad de que la conversión se lleve a cabo por la intervención de pequeñas secuencias homólogas distribuidas a lo largo del genoma [Chaudhury, *Nature* 437, E1-E2 (2005)]. Otra posible alternativa es que realmente existieran en algunas células de las plantas mutantes copia del gen silvestre en forma de fragmentos de DNA heterocromatizados y silenciados, que habrían sido adquiridos por la línea germinal femenina a partir de los núcleos degenerados hermanos del óvulo. Estos fragmentos de DNA, al estar en forma de heterocromatina, serían difícilmente detectables por hibridación molecular o PCR [Ray, *Nature* 437, E2 (2005)]. Lolle y cols. contestaron a ambos comentarios reafirmando en su hipótesis [Lolle y cols., *Nature* 437,

E2 (2005)]. Una tercera explicación totalmente distinta, que no necesita invocar la existencia de fenómenos genéticos novedosos, contempla que ciertas mutaciones en el gen *HOTHEAD* puedan dar lugar a la acumulación de metabolitos secundarios que sean tóxicos y mutágenos, lo que provocaría un incremento de la tasa de mutación en todo el genoma. La selección que tiene lugar durante el proceso de polinización ocasionaría el elevado número de alelos silvestres observados [Comai y Cartwright, *Plant*

Cell 17, 2856-2858 (2005)].

Los experimentos futuros, que sin duda llevarán a cabo tanto el laboratorio de Robert Pruitt como otros, permitirán discernir cuál o cuáles de los mecanismos propuestos pueden explicar dicha herencia. Por otra parte, podrán poner de manifiesto si el tipo heterodoxo de herencia descrito es una excepción o está distribuido más o menos ampliamente en otros mutantes o especies de plantas o animales.

BREVE HISTORIA DE LA ECOLOGÍA: VICISITUDES Y PRETENSIONES DE UNA NUEVA CIENCIA (III)

José M^a Blanco Martín

Profesor titular de Ecología. Departamento de Ecología y Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. 29071 Málaga.

Proceso, estructura, función

El éxito de los Odum en la extracción de las propiedades sistémicas movió a algunos científicos del último cuarto de siglo hacia la mitificación del ecosistema, haciendo de su concepción —más que de su realidad— la base de elaboración de teorías. Bertalanffy propone en 1968 una teoría general de sistemas¹, en la que identifica ciertas unidades que realizan ciertos procesos. Como consecuencia de la coordinación de estas unidades y de los procesos que realizan, surgen agrupaciones funcionales que, en su conjunto, se organizan en una estructura: el propio sistema².

En el razonamiento de Bertalanffy hay una escalada en la complejidad del sistema, que incluso puede ser autosimilar, de forma que las unidades de un sistema sean sistemas en sí mismas³. En otras palabras, en cualquier sistema se puede identificar un escalafón de identidades —ya sean unidades, procesos, funciones o estructuras completas— que dan lugar a una organización jerárquica. Allen y Starr⁴ prosiguen en la sublimación de esta teoría jerárquica⁵ y contribuyen al ya alto verbalismo de esta vía del pensamiento con nuevas palabras como «holón». Un holón está formado por aquellas unidades de un nivel que interaccionan más íntimamente. No hay motivo para limitar el número de holones en un nivel; lo que sí es evidente es que las unidades de un holón interaccionan poco o nada con las de otro. Por tanto, las interacciones entre holones —como supraunidades que expresan el promedio del comportamiento de las unidades que lo forman— serán mucho más débiles que las interacciones dentro de los mismos holones. Aún así, está justificado el reunir estos holones en otros holones de mayor categoría, teniendo en cuenta la intensidad de sus interacciones⁶. La principal conclusión de este argumento mental es que los procesos se van enlenteciendo y las interacciones diluyendo conforme se escalan niveles de complejidad.

Las unidades que forman un holón pueden tener cualquier naturaleza. Si fuesen individuos, un holón sería aquel grupo de individuos más estrechamente relacionados.

De tratarse de procesos, el holón sería una unidad funcional con una capacidad de maniobra determinada. Aún se le pueden buscar más naturalezas a los holones⁷, pero estas dos son las que utilizaron O'Neill et al.⁸ para aplicar la teoría jerárquica a los sistemas vivos. Por una parte, identifican una jerarquía biótica (individuo → población → comunidad → ecosistema) y por otra, una jerarquía funcional (organismo → nivel trófico → ecosistema) que, básicamente, corresponden con las ramas biótica y termodinámica en las que tradicionalmente se reparten los ecólogos.

En mi opinión, no es ése el valor principal de la teoría jerárquica, sino la posibilidad que ofrece para identificar escalas en la organización de los ecosistemas. Cada nivel se esparce a lo largo de dos dimensiones: una espacial y otra temporal. Cada holón se mueve en ambas dimensiones con una amplitud y una frecuencia características del nivel al que pertenece (Figura 2). Es fácil deducir que sólo los sistemas en los que disminuyen frecuencia y amplitud cuando aumenta el nivel pueden ser estables⁹ y llegar a constituirse en un número respetable de niveles. Esta conclusión a la que conduce la teoría jerárquica es observada en la naturaleza: todas las estructuras espacio-

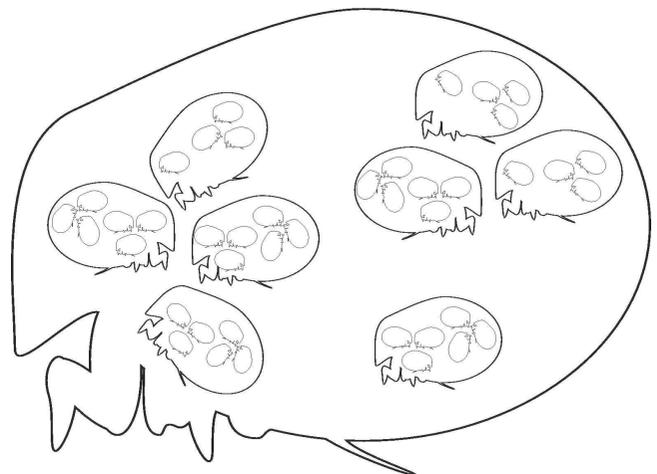


Figura 1. Una idealización de la estructura jerárquica inspirada en J. Swift.

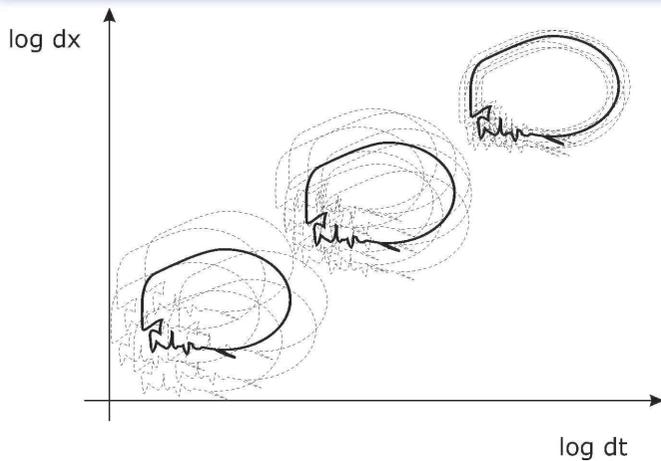


Figura 2. Interpretación gráfica de la variancia asociada a una estructura, que disminuye relativamente al aumentar su complejidad; de otra forma el sistema sería inestable.

temporales están caracterizadas por una armoniosa variancia que impregna tamaños de individuos, poblaciones y todo tipo de fenómenos. El análisis de la naturaleza, por tanto, está condicionado por la escala a la que se realiza la observación; y los métodos de ésta, al igual que las conclusiones elaboradas a partir de ella, igualmente están determinados por las características de la escala¹⁰.

Disipación e información

¿Existen realmente estas escalas en la naturaleza o son exclusivamente producto de la forma de pensar humana?¹¹ Parece ser que sí, que existen ciertas ventanas por las que fluye la energía en su atropellado descenso hacia la entropía¹². Ante una pregunta que se hace Margalef «¿Por qué la vida no está organizada en forma de una lámina continua extendida sobre la Tierra, sino repartida en organismos separados unos de otros? ¿Por qué hay plantas, animales y bacterias, y no un tipo único de organismos, con producción y respiración equilibradas? [...encadenadas con otras que lo llevan a su famoso paradigma del barroco de la naturaleza]»¹³, surge la física de sistemas abiertos alejados del equilibrio, desarrollado por Prigogine¹⁴ a finales de los 70, verdadera musa de inspiración de la cual se han surtido multitud de ecólogos.

La idea básica es que la energía se trasmite en un gradiente y forma «remolinos» en su fluir (ver las analogías de la Figura 3). Estos remolinos disipan más rápidamente la energía y, por tanto, tienden a mantenerse mientras se mantenga el gradiente. Los seres vivos son unos remolinos un tanto particulares, pues son autocatalíticos y, además, acentúan el gradiente al aumentar el abanico de absorción de energía y el estado final de degradación de la energía¹⁵. Esta es la razón por la que la vida no se conforma¹⁶ con una lámina uniforme y progresa paulatinamente hacia estructuras más complejas que aumentan la eficiencia disipativa. En este sentido, la vida es un hecho termodinámico inevitable en el universo¹⁷.

Es evidente que el individuo es una de esas ventanas o remolinos disipativos de energía. ¿Se puede considerar al ecosistema como otra ventana disipativa?

Sí, en mi opinión. Aunque la interpretación exhaustiva de la física de sistemas disipativos escapa de los límites de

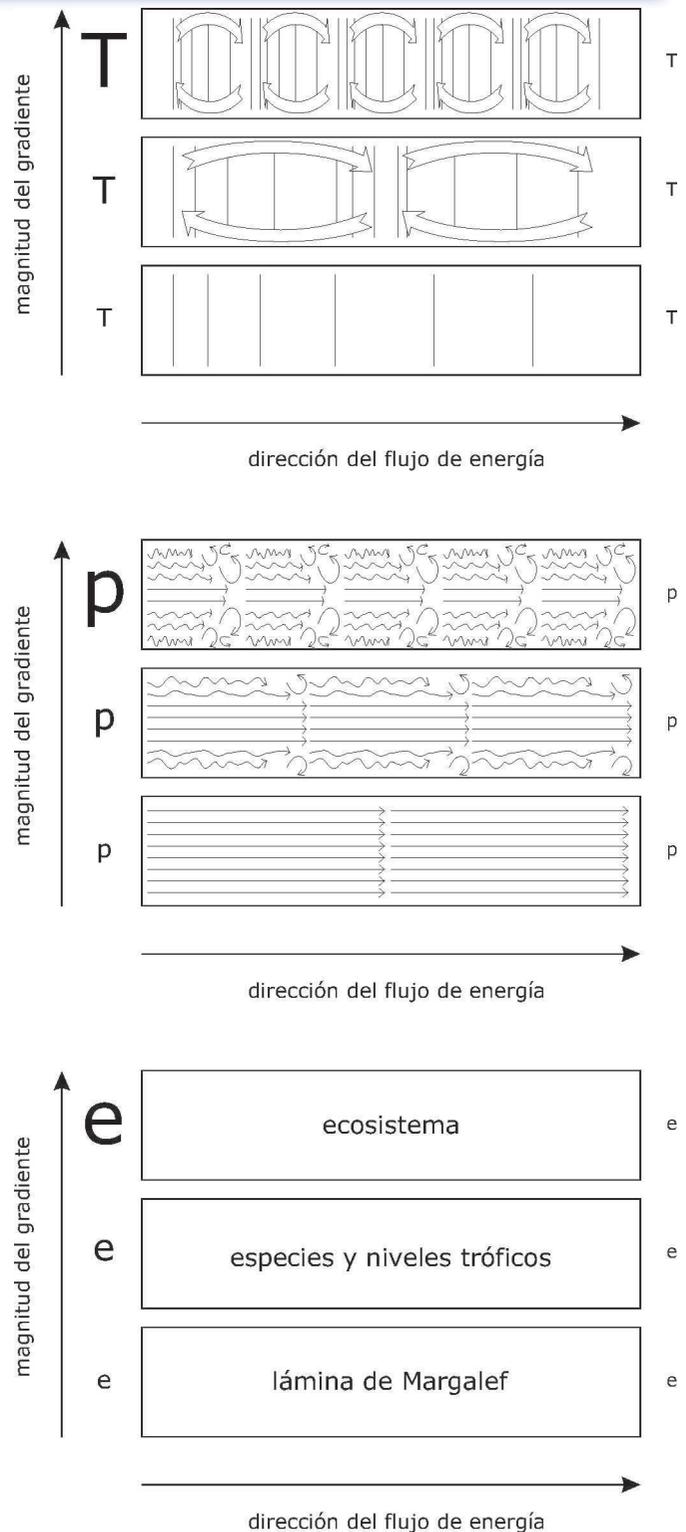


Figura 3. Analogías entre sistemas disipativos. De arriba abajo, flujo de calor a través de un fluido, movimiento de un fluido en un gradiente de presión y de energía a través de un sistema vivo. Cuando el flujo aumenta, aparecen estructuras más o menos estacionarias que disipan rápidamente la energía y sólo persisten si se mantiene el gradiente.

este artículo—y de los míos—y por estas mismas razones es condenada como una teoría oscura cuyo valor principal se basa en la incomprensibilidad¹⁸, creo que ofrece un marco teórico común a todas las ramificaciones de la ecología. A pesar de que el uso real de la teoría sea ciertamente

reducido, su valor heurístico permite educar la forma de pensar y, aunque sea indirectamente, generar nuevas líneas de desarrollo de la teoría ecológica.

La existencia de estas fluctuaciones en el flujo de energía se podría interpretar como un tipo de holones —otro más— y, por tanto, estar relacionados jerárquicamente por un incremento en la complejidad. Un ecosistema es mayor (en tiempo y espacio), más estable, consume más energía y es más complejo que un individuo, pero ¿se podría decir algo sobre la relación entre estos cuatro atributos de los sistemas en general? Margalef, atento inquisidor de las teorías que se desarrollaban contemporáneamente con la ecología, importa a la ecología una medida de la complejidad ideada por Shannon con fines ingenieriles¹⁹. La cantidad de información contenida en un sistema es la suma ponderada de la abundancia —logarítmica— de cada uno de los elementos. El paralelismo con la teoría jerárquica y con la física de sistemas abiertos es patente: la primera predice un aumento de la complejidad al escalar niveles, acompañada de una disminución de la intensidad de las interacciones entre los elementos; la teoría de la información, aplicada a los ecosistemas, predice igualmente un aumento de la información —que se puede relacionar con la diversidad— ligada a la formación de nuevas estructuras en el marco disipativo²⁰. Es evidente que el grado de abstracción necesario para navegar en estas teorías es alto y no todos los ecólogos²¹ fueron partidarios de tanta inversión conceptual con tan poca ganancia práctica.

Notas

¹ BERTALANFFY, L. VON. 1968. *General systems theory: foundations, development, applications*. Braziller. New York.

² Inocentemente, podría poner un ejemplo con moléculas, orgánulos y una célula, obien con electrones, «microchips» y un ordenador, pero me abstengo para no caer en un excesivo metafóriso.

³ Nótese cómo la abstracción radical es el elemento predominante en este razonamiento.

⁴ ALLEN, T.F. AND T.B. STARR. 1982. *Hierarchy: perspectives for ecological complexity*. Chicago University Press. Chicago.

⁵ Etimológicamente, «jerarquía» es el escalafón que se establece entre los diversos coros de ángeles y arcángeles, y por extensión se utiliza habitualmente en el mundo terrenal. La ironía está servida.

⁶ Esto, que parece un trabalenguas, es la descripción verbal de una estructura fractal (de las que hablaré en el siguiente capítulo), y se parece mucho a la famosa rima de Johnathan Swift que habla de las pulgas de las pulgas que a su vez tienen pulgas en *On poetry, a rhapsody*.

⁷ Por ejemplo, que fuesen entelequias tales como axiomas, que se agrupan para formar teoremas —holones del nivel superior— y éstos a su vez para formar teorías. O más humildemente, letras para formar palabras, párrafos, capítulos, etc. La fuerza del teorema o la información implícita en cada nivel es cualitativamente distinta de la presente en el nivel inferior y, por ello, se habla de «propiedades emergentes» conforme se asciende por los niveles. Nótese cómo esta teoría induce irremediamente a la especulación

y a la búsqueda constante de ejemplos donde asir el razonamiento.

⁸ O'NEILL, R.V., D.L. DEANGELIS, J.B. WAIDE AND T.F. ALLEN. 1986. *A hierarchical concept of ecosystems*. Princeton University Press. Princeton.

⁹ A esta conclusión se puede llegar mediante reducción al absurdo. Consideremos que exista un sistema estable —es decir, que sea capaz de contener todos sus elementos espacio-temporales— en los que frecuencia o amplitud aumenten con el nivel, entonces para cualquier elemento dado caracterizado por un tamaño determinado (en espacio y tiempo), habrá un nivel en el que la amplitud o frecuencia lo dejen fuera del mismo, con lo cual se contradice la premisa de partida.

¹⁰ Los propios científicos también están organizados en niveles: físicos, químicos, bioquímicos, fisiólogos, zoo-botánicos y ecólogos.

¹¹ La percepción humana es de naturaleza logarítmica y presta una atención al detalle proporcional al tamaño del objeto (real en el caso de los sentidos e imaginario en el caso del pensamiento). Por ejemplo, el agrupamiento de objetos mediante el criterio «tamaño similar» genera distribuciones logarítmicas. Incluso afecta al sistema de numeración, como cierta tribu de indios norteamericanos que utilizaban un sistema logarítmico extremadamente simple pero excepcionalmente útil: 1, 2, «detres a cinco» y «muchos».

¹² Nótese —pero excútese— la frivolidad con la trato aquí términos termodinámicos de significado físico tan preciso.

¹³ MARGALEF, R. 1986. *Ecología* (5ª ed.) Omega. Barcelona. (página 883).

¹⁴ PRIGOGINE, I. 1980. *From being to becoming; time and complexity in the physical sciences*. Freeman. San Francisco.

¹⁵ De nuevo me permito licencias inaceptables desde el rigor físico. La energía no se degrada propiamente, sino que los procesos ocurren en el sentido en que la energía libre del sistema, G (la energía interna o «útil» U menos el producto de la temperatura por la entropía o «desorden» S) disminuya. Los organismos catalizan las reacciones y facilitan los procesos con ΔG muy pequeños, y por ello, no sólo son termodinámicamente tolerados, sino incluso bienvenidos.

¹⁶ El organicismo presente en esta frase es puramente literario. Se trata de otra versión del principio de máxima potencia (ver capítulo anterior).

¹⁷ SAGAN, C. 1982. *Cosmos*. Planeta. Barcelona.

¹⁸ T. FENCHEL, en *Ecology: potentials and limitations* (1987. Ecology Institute. Oldendorf/Luhe), parece actuar como el niño del cuento de Andersen que llama la atención sobre el desnudo emperador, eso sí, con toda educación.

¹⁹ SHANNON, C.E. 1948. *A mathematical theory of communication*. Bell Systems Technology Journal, 27. Citado por DELÉAGE (op. cit.). En este artículo, Shannon analiza la probabilidad de que un mensaje se transmita erróneamente y para ello idea un índice que mide la cantidad de información contenida en el mensaje. En ningún momento se habla de diversidad; esta es una acepción posterior del índice, una vez importado a la ecología.

²⁰ R.M. MAY (1974. *Stability and complexity in model ecosystems*. Princeton University Press. Princeton) llega a la misma conclusión considerando que el producto de la riqueza específica por la intensidad de las interacciones en un sistema estable se mantiene acotado en un rango.

²¹ P. COLINVAUX (1983. *Porqué son escasas las fieras*. Orbis. Barcelona. Edición española del original de 1978 publicado por la Princeton) ataca con su acostumbrada acritud este enfoque y ofrece numerosos casos reales en los que, aparentemente, no se cumple. Para explicarlo, ofrece una visión flagrantemente finalista de la función de los organismos en el encauzamiento de la energía, según la cual «... [los organismos] dedican sus esfuerzos a detener el movimiento de la comida [...] y hacen todo lo posible por asegurarse la comida e impedir que otros puedan tomarla»