

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<sup>a</sup> 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 sistemas<sup>1</sup>, 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 sistema<sup>2</sup>.

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 mismas<sup>3</sup>. 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 Starr<sup>4</sup> prosiguen en la sublimación de esta teoría jerárquica<sup>5</sup> 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 interacciones<sup>6</sup>. 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 holones<sup>7</sup>, pero estas dos son las que utilizaron O'Neill et al.<sup>8</sup> 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 estables<sup>9</sup> 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-

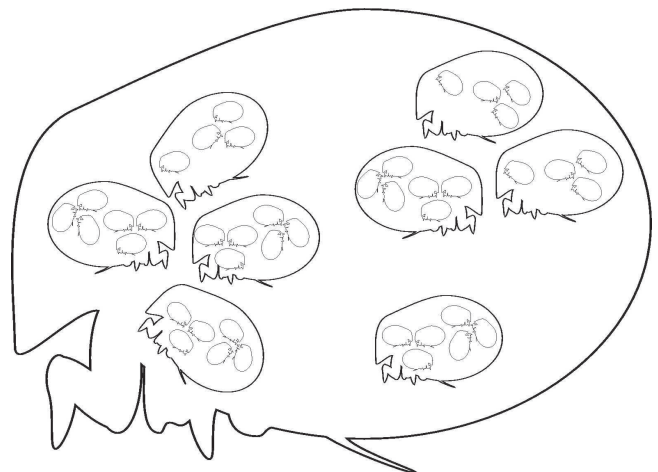


Figura 1. Una idealización de la estructura jerárquica inspirada en J. Swift.

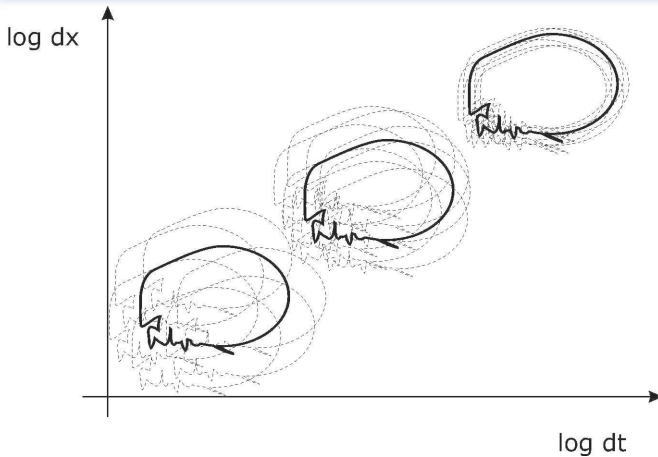


Figura 2. Interpretación gráfica de la variancia asociada a una estructura, que disminuye relativamente al aumentar su complejidad; de otra forma el sistema sería inestable.

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 escala<sup>10</sup>.

**Disipación e información**

¿Existen realmente estas escalas en la naturaleza o son exclusivamente producto de la forma de pensar humana?<sup>11</sup> Parece ser que sí, que existen ciertas ventanas por las que fluye la energía en su atropellado descenso hacia la entropía<sup>12</sup>. 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]»<sup>13</sup>, surge la física de sistemas abiertos alejados del equilibrio, desarrollado por Prigogine<sup>14</sup> 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 energía<sup>15</sup>. Esta es la razón por la que la vida no se conforma<sup>16</sup> 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 universo<sup>17</sup>.

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

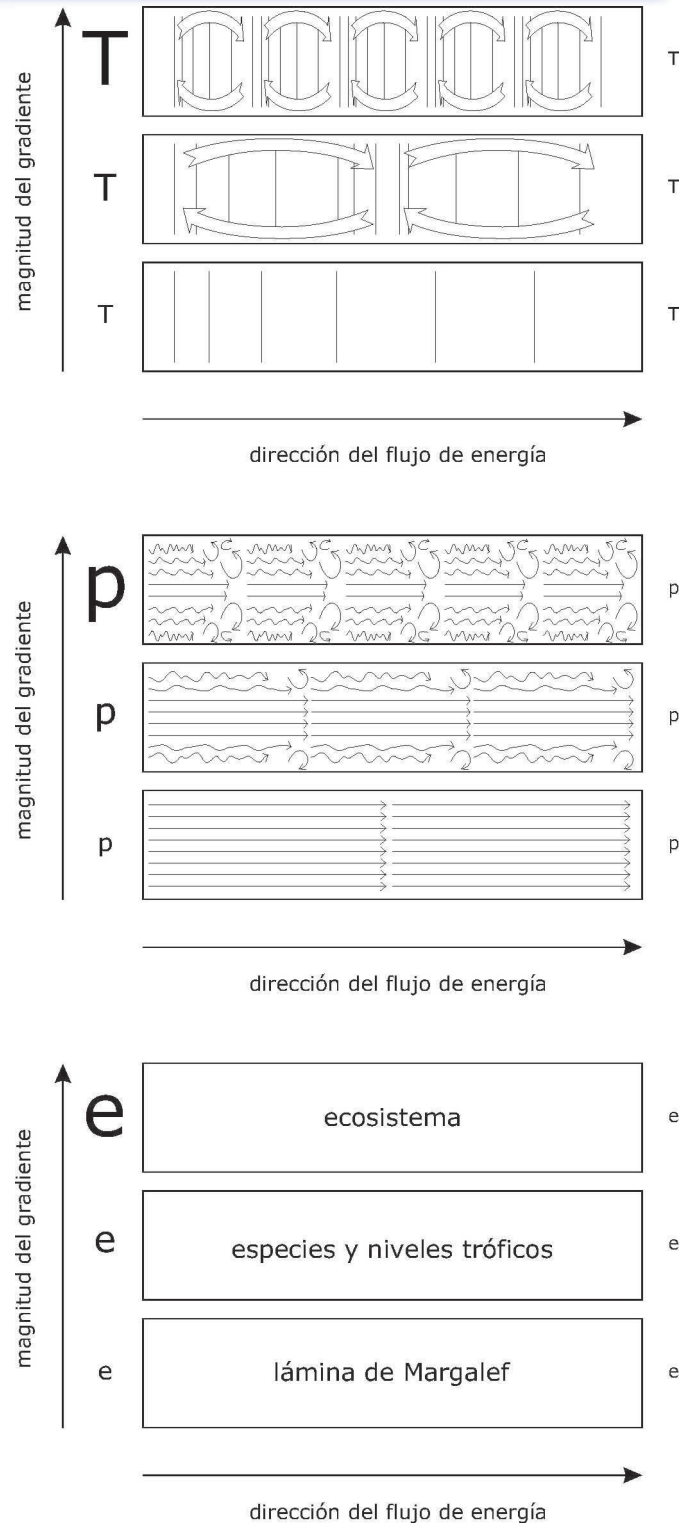


Figura 3. Analogías entre sistemas disipativos. De arriba abajo, flujo de calor a través de un fluido, movimiento de un fluido en un gradiente de presión y de energía a través de un sistema vivo. Cuando el flujo aumenta, aparecen estructuras más o menos estacionarias que disipan rápidamente la energía 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 incomprensibilidad<sup>18</sup>, 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 ingenieriles<sup>19</sup>. 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 disipativo<sup>20</sup>. Es evidente que el grado de abstracción necesario para navegar en estas teorías es alto y no todos los ecólogos<sup>21</sup> fueron partidarios de tanta inversión conceptual con tan poca ganancia práctica.

### Notas

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

<sup>2</sup> 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 metaforismo.

<sup>3</sup> Nótese cómo la abstracción radical es el elemento predominante en este razonamiento.

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

<sup>5</sup> 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.

<sup>6</sup> 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*.

<sup>7</sup> 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.

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

<sup>9</sup> 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.

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

<sup>11</sup> 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».

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

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

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

<sup>15</sup> 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  $\Delta G$  muy pequeños, y por ello, no sólo son termodinámicamente tolerados, sino incluso bienvenidos.

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

<sup>17</sup> SAGAN, C. 1982. *Cosmos*. Planeta. Barcelona.

<sup>18</sup> 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.

<sup>19</sup> 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.

<sup>20</sup> 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.

<sup>21</sup> 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»