

Complejidad y vida: algunas reflexiones

Luis Alvaro Cadena Monroy¹

Resumen

Se hace una propuesta sobre la evolución en la que se sugiere que las tres principales teorías evolutivas, neodarwinismo, neutralismo y equilibrio puntuado, pueden ser complementarias. Se sostiene que el proceso evolutivo tiene dos fases, a las que se les denomina selección invertida (en la que los individuos crean y configuran su entorno) y selección normal (en la que el medio selecciona las alternativas que se le adaptan). Se pasa a considerar algunas propuestas sobre procesos y sistemas complejos (estructuras disipativas, caos, complejidad algorítmica y computacional), y se discute sobre la pertinencia de estos enfoques dentro de la propuesta evolutiva.

Palabras claves: Evolución, teorías evolutivas, sistemas complejos, caos, estructuras disipativas, complejidad algorítmica, complejidad computacional.

Abstract

It is presented an approach, in which it is suggested that the three main evolutionary theories Neo-Darwinism, Neutralism and punctuated equilibrium

¹ PhD. Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Profesor e Investigador, Universidad El Boque, e-mail: l_a_cadena_m@yahoo.es

can be complementary. It is stated that evolutionary processes occur in two phases: 1. the first one that is here dubbed as reverse selection (in which individuals create and shape their environment), and 2. normal selection (in which the environment selects the adapted alternative variants). Some ideas derived from complex systems and processes (dissipative structures, chaos theory, algorithmic and computational complexity) are considered and their contribution to evolutionary theory is examined.

Keywords: Evolution, evolutionary theories, complex systems, chaos, dissipative structures, algorithmic complexity, computational complexity.

1. Una propuesta sobre el fenómeno de la evolución orgánica

Actualmente existen, fundamentalmente, tres propuestas sobre el proceso evolutivo orgánico: neodarwinismo, neutralismo y equilibrio puntuado. Estas propuestas son presentadas por sus defensores más ortodoxos como irreconciliables; sin embargo, trataremos de mostrar que estas propuestas evolutivas pueden resultar, más bien complementarias, y no antagónicas.

1.1. *Neodarwinismo o teoría sintética de la evolución*

Antes de Darwin, se habían hecho varias propuestas sobre la evolución de los organismos. Incluso su abuelo, Erasmus Darwin, había escrito un enorme libro sobre la evolución. Sin embargo, estas teorías carecían de un principio que respondiera al por qué evolucionaban los organismos. El primero en sugerir por qué se presentaba el fenómeno de la evolución fue Jean Baptiste Lamarck. Según decía hace ya varios años, E. Mayer, para Lamarck había cuatro principios que explicaban la evolución: 1. En los organismos existe un impulso interno a la perfección. 2. Los organismos tienen una capacidad de adaptarse a las circunstancias. 3. La generación espontánea. 4. La herencia de los rasgos adquiridos (Mayer, E., 1979). En otras palabras, los seres vivos en su “afán” de perfección, se adaptan a las circunstancias, heredando los rasgos adquiridos. Estos principios de Lamarck fueron publicados en 1809, pero él ya había expresado sus primeras tesis evolucionistas desde 1801.

Darwin nació en Inglaterra en 1809. No fue un estudiante brillante. Empezó, pero no terminó medicina, que era la profesión preferida de su familia. Estudió teología, aunque su gran afición era el naturalismo (Darwin, Ch., 1993). Uno de sus profesores, teniendo en cuenta su gran capacidad de observación, lo sugirió como el naturalista que se buscaba para ser incluido en el barco Beagle. El viaje se extendió desde diciembre de 1831 hasta octubre de 1836. Ya durante el viaje, Darwin había empezado a hacer anotaciones sobre el proceso de la evolución. Todo el año de 1837 se le fue en ordenar los elementos que había recolectado. Una vez terminado esto, Darwin se entregó a la búsqueda de un principio que explicara la evolución. Ese principio (la selección natural) llegó a su mente con la lectura, en septiembre de 1838, del ensayo de Malthus sobre la población.

Malthus decía que las poblaciones humanas tienden a crecer de manera exponencial. Esto traería como consecuencia el agotamiento de los recursos para subsistir. Sin embargo, el hambre, la enfermedad y la guerra impedirían el incremento exponencial de la población (Dobzhansky, Th., 1980). Darwin percibía que la tendencia al crecimiento exponencial debería ser una característica de todos los seres vivos. No obstante, las poblaciones naturales parecían ser más o menos constantes. En consecuencia, sólo sobreviven algunos, pereciendo los demás. La supervivencia no resulta ser, entonces, un fenómeno puramente aleatorio. Sobrevivirán aquellos que se encuentren mejor adaptados a su medio ambiente (Dobzhansky, Th., 1980). En los años subsiguientes, Darwin fue desarrollando su teoría. En 1842 elaboró un primer bosquejo. En 1844 escribió un ensayo completo de sus ideas. Se lo confió a su esposa y se dedicó por varios años a estudiar anatomía de los cirrípedos (unos moluscos marinos), pues temía que su falta de preparación en zoología echara a perder su teoría. Cuando se sintió preparado como zoólogo, retomó su teoría (Omodeo, P., 1968). Darwin no se decidía a publicar, a pesar de los pedidos de sus amigos. Al mismo tiempo, Alfred Russel Wallace, padeciendo de malaria en la isla de Halmahera, recordó las ideas de Malthus sobre la población, y llegó a un principio semejante al de la selección natural. Sin saber que Darwin había formulado la teoría de la evolución por selección desde hacía veinte años, Wallace le escribió a Darwin consultándole cómo le parecía el principio que recién había

elaborado. Darwin recibió la carta en febrero de 1838. Temía parecer mesquino, pero no deseaba perder la prioridad sobre la teoría de la selección natural. Por consejo de sus amigos, presentó un resumen de sus ideas junto con la carta de Wallace a la Sociedad Linneana. Nadie dudó de la primacía de idea de la selección de Darwin (Omodeo, P., 1968). Trabajó por un espacio de quince meses y, finalmente publicó “El origen de las especies” en noviembre de 1859. Allí decía: “A esta conservación de las variaciones y diferencias individualmente favorables y la destrucción de las que son perjudiciales, la he llamado *selección natural o supervivencia de los más aptos*” (Darwin, Ch., 1983; la cursiva es de Darwin).

Para explicar la transformación de los seres vivos Darwin invoca cuatro principios: 1. El mundo no es inmodificable, por el contrario evoluciona. 2. La evolución es un proceso gradual y continuo. 3. Los organismos semejantes resultaban estar emparentados, es decir, deberían tener un antepasado común. 4. El cambio de los organismos no era el resultado de un impulso interno hacia la perfección, sino resultado de la selección natural (Mayer, E., 1979).

La idea de Darwin implicaba que deberían ocurrir dos procesos independientes: uno, el de la producción de variabilidad heredable y, otro, el de la selección. Como la producción de variabilidad es independiente (es decir, no ocurre, necesariamente, en la dirección) de la selección, se dice que la producción de variabilidad es aleatoria. De esta manera, y en palabras de J. Monod, la evolución resulta ser un proceso de azar y necesidad (Monod, J., 1977). A pesar de lo revolucionario de la teoría de la selección natural, ella carecía de una explicación del fenómeno de la herencia de la variabilidad.

Los fundamentos de la teoría de la herencia (genética) fueron establecidos, de manera desconocida, por Gregor Mendel. El redescubrimiento de las ideas de Mendel, y el posterior desarrollo de la genética, llevó a la llamada genética de poblaciones, es decir, el estudio de los genes en las poblaciones. Debido a que la herencia es un fenómeno esencialmente conservador, los genetistas de comienzos del siglo veinte sugirieron que la única forma en que se generaba el cambio en los organismos era mediante el fenómeno de la mutación a gran escala, y que la selección

y el cambio gradual y continuo de Darwin eran insostenibles desde el punto de vista de la genética.

Después de largas disputas entre los genetistas y los darwinistas, a finales de los años veinte y comienzos de los treinta del siglo pasado, la genética de poblaciones y la selección natural se unieron en una teoría única, llamada teoría sintética o neodarwinismo. A este gran logro contribuyeron R. A. Fisher, S. Chetverikov, J. B. S. Haldane, S. Wright y Th. Dobzhansky. Con la propuesta de J. D. Watson y F. H. Crick, en abril de 1953, sobre la estructura molecular de los ácidos nucleicos, y el estudio de los procesos de replicación, transcripción, y traducción de la información genética, el neodarwinismo recibió un respaldo fuertísimo que lo hizo parecer incuestionable.

La teoría sintética sugiere que la evolución debería ser definida como la supervivencia y reproducción diferencial de los organismos. Desde sus comienzos, la teoría sintética afirmó que la selección resultaba ser el cambio de las frecuencias génicas. Basándose en la genética de poblaciones, esta teoría presenta de manera cuantitativa la idea de la selección de Darwin y precisa la naturaleza de la producción de la variabilidad heredable. No nos extenderemos sobre esto, pues es un tema ampliamente tratado en cualquier texto de genética. No limitaremos a decir que para la teoría sintética -como lo sostenía Darwin- la evolución tiene dos fases: producción de variabilidad heredable, y selección. De igual manera que para Darwin, la producción de variabilidad es independiente de la dirección de la selección, es decir, es aleatoria. De esta forma, y otra vez acudiendo a la terminología de Monod, la evolución es un proceso de azar (producción de variabilidad heredable) y necesidad (selección).

Por otra parte, y con relación al proceso de adaptación, la teoría sintética sostiene que "...el ambiente plantea ciertos 'problemas' que los organismos necesitan 'resolver', y [...] la evolución a través de la selección natural constituye el mecanismo para crear dichas soluciones. La adaptación es el proceso del cambio evolutivo mediante el cual el organismo procura una 'solución' al 'problema' cada vez mejor, siendo el resultado final la adaptación" (Lewontin, R., 1979). Para el neodarwinismo o teoría sintética, el proceso evolutivo es gradual y continuo, como lo pensaba

Darwin: “Según parece, la mayoría de los cambios evolutivos se producen por acumulación gradual de mutaciones ínfimas (análogas a apretar un tornillo), acompañadas por transiciones lentas en las características físicas de los individuos de la población” (Ayala, F., 1979).

1.2. *Neutralismo*

Para los neodarwinistas, la existencia de la variabilidad en las poblaciones, incluso a nivel molecular, es un fenómeno que se debe a la selección natural (Ayala, F., 1979): según el Teorema Fundamental de la Selección Natural, de Fisher, “*La tasa con que incrementa la eficacia biológica de la población en un momento determinado es igual a su variabilidad genética respecto a la eficacia biológica en ese momento*” (Ayala, F., 1980). Los neodarwinianos creen que los cambios evolutivos, a nivel fenotípico y a nivel genotípico, tienen su origen en la selección. Sin embargo, M. Kimura realizó dos descubrimientos que ponían en duda la afirmación de que las variantes moleculares se mantuvieran en las poblaciones por efecto de la selección natural: 1. Para una proteína dada, la tasa de sustitución de un aminoácido por otro es similar en diversas y numerosas líneas filogenéticas. 2. Las sustituciones parecen ocurrir aleatoriamente (Kimura, M., 1987). Aquí la aleatoriedad hace referencia a la llamada deriva genética, según veremos unos renglones más abajo.

Para los neutralistas existen dos niveles de evolución: uno es el de la evolución molecular, y el otro es el de la evolución fenotípica. Estas dos formas de evolución son esencialmente diferentes: la evolución fenotípica podría estar gobernada por la selección natural, en tanto que la evolución molecular estaría gobernada por las leyes del azar, es decir, a nivel molecular la selección natural tendría poco o ningún efecto (Kimura, M., 1987).

La evolución molecular se refiere a las sustituciones de bases nitrogenadas de los genes que codifican proteínas o, de manera semejante, se considera que la evolución molecular consiste en la sustitución de aminoácidos de las proteínas codificadas por los genes del ADN. La mayoría de los genes mutantes son selectivamente neutros, lo que quiere decir que no tienen mayor o menor eficacia biológica que los demás (Kimura, M., 1987). En

el proceso de mutación de los genes, se producen cambios que no tienen mayor o menor valor selectivo. Estos cambios no son percibidos por la selección natural, y por ello se llaman neutros. Los mutantes neutros (por ejemplo, proteínas que difieren en un solo aminoácido) no son más eficientes ni menos eficientes en sentido darwiniano. Son igualmente eficientes. Sin embargo algunos mutantes pueden fijarse. Esta fijación de un gen (es decir, la extensión del gen en toda la población después de varias generaciones) ocurre aleatoriamente; por deriva: la frecuencia de los genes mutantes neutros que no son percibidos por la selección, fluctúa aleatoriamente, a través de las generaciones, hasta que alguno de ellos logra fijarse, desapareciendo las demás variantes neutras. Esto sucede porque en el proceso de la reproducción es tomado un número pequeño de gametos del enorme número de gametos existentes. En este proceso de deriva aleatoria, la gran mayoría de mutantes desaparece por azar, sin embargo, los restantes tienden a fijarse en las poblaciones (Kimura, M., 1987).

Se ha visto que las proteínas –o partes de ellas- que presentan bajas limitaciones funcionales, tienen una mayor tasa evolutiva (o sustitución de aminoácidos) que aquellas proteínas que presentan una alta limitación funcional. Según el neutralismo, y a nivel molecular, a menor presión selectiva, mayor cambio evolutivo.

Hay cierta forma de variabilidad genética, denominada polimorfismo, es decir, la presencia de dos o más formas de una proteína en una misma especie. Los neodarwinianos consideran que la existencia del polimorfismo en las poblaciones es efecto de la selección natural, lo que vendría a decir que las variaciones del medio ambiente determinarían el grado de polimorfismo: a mayor variación en el medio ambiente mayor presión selectiva y, por tanto, mayor polimorfismo. Sin embargo, y frente a esta situación, los neutralistas dirían todo lo contrario: a mayor presión selectiva, menor tasa de evolución molecular y menor polimorfismo. Para esclarecer esta disyuntiva, se relacionaron polimorfismo y grado de variabilidad ambiental. Se considera que el ambiente en los fondos submarinos es relativamente estable, en tanto que el ambiente en la zona intermareal es muy variable. En estos dos ambientes, el grado de polimorfismo predicho por los seleccionistas es completamente opuesto al

predicho por los neutralistas. Según los seleccionistas, el polimorfismo en las poblaciones de las zonas intermareales debería ser mayor que en las poblaciones de los fondos submarinos. Según los neutralistas, la situación debería ser todo lo contrario: el polimorfismo de las poblaciones en los fondos submarinos debería ser mayor que el polimorfismo de las poblaciones de las zonas intermareales. Cuando se analizó el polimorfismo de estos dos tipos de poblaciones, resultó que el polimorfismo era mayor en las poblaciones de los fondos submarinos que en las poblaciones de las zonas intermareales (Kimura, M., 1987).

1.3. *Equilibrio puntuado*

Darwin creía, muy profundamente, que la evolución era un proceso gradual y continuo. Un día antes de que publicara el origen de las especies, T. H. Huxley -que resultó ser un seguidor y defensor ferviente de las ideas de Darwin-, le dijo a Darwin que se había colocado una dificultad innecesaria al hacer suya la frase de Linneo “Natura non facit saltum”, es decir, la naturaleza no da saltos. Esta convicción le hacía decir a Darwin que los cambios evolutivos que darían lugar a especies nuevas deberían ser graduales. Las especies no podrían aparecer repentinamente. Actualmente, el neodarwinismo continúa afirmando que la formación de especies (especiación) es un proceso gradual. Sin embargo, en el registro fósil, grupos muy grandes de especies suelen aparecer o desaparecer de modo más o menos repentino. Darwin conocía esta situación, sin embargo, para explicar el por qué del “cambio repentino” en el registro fósil, decía que este registro estaba incompleto (Gould, S. J., 1985).

Desde el punto de vista neodarwiniano, F. Ayala sugiere que la evolución presenta dos dimensiones, una es la evolución filética, y otra es la especiación (o formación de especies). La evolución filética consiste en todos aquellos cambios graduales que llevan a los organismos a adaptarse a su medio ambiente. De otra parte, la especiación ocurre cuando una línea de descendencia se divide en dos, tres o más líneas nuevas. Esta especiación tendría dos etapas: en la primera, habría un cierto aislamiento entre dos poblaciones de manera que no habría la posibilidad de un intercambio genético entre ellas, lo cual llevaría a un aislamiento

reproductivo. En una segunda etapa, el aislamiento reproductivo culmina si es favorecido por la selección natural. Con ello, se habrá concluido la formación de la especie nueva. La primera etapa –dice Ayala– es, en términos generales, un proceso gradual: dos poblaciones que, por una u otra circunstancia, se aíslan (generalmente por razones geográficas), comienzan a tener divergencias genéticas originadas en las adaptaciones de las poblaciones a las peculiaridades de su ambiente. Si la divergencia genética ha sido suficientemente grande, y si, por cualquier circunstancia, vuelven a unirse estas poblaciones, lo más probable es que los híbridos no sean viables o tengan una eficacia biológica marcadamente menor a la de los individuos de las dos poblaciones no híbridas. Con esto, la selección natural favorecerá el aislamiento reproductor, formándose las dos nuevas especies (segunda etapa). Si la divergencia no es muy grande cuando vuelven a juntarse las dos poblaciones, entonces el proceso de aislamiento podría ser reversible (Ayala, F., 1979).

En 1972, N. Eldredge y S. J. Gould propusieron la llamada teoría del equilibrio puntuado (o de los equilibrios puntuados) como alternativa a la idea darwiniana y neodarwiniana de que el cambio evolutivo (en particular, la especiación) es fruto de acumulaciones graduales de mutaciones ínfimas favorables. Ellos creen que se puede mantener la idea central de Darwin (la selección natural), sin necesidad de postular el gradualismo. Los mencionados autores parten de la observación de que en el registro fósil se presentan dos fenómenos: 1. Estasis. La mayoría de especies no presentan cambios direccionales durante su existencia en la tierra. En el registro fósil aparecen con un aspecto muy semejante al que tienen cuando desaparecen. El cambio de su morfología es restringido y no orientado. 2. Aparición repentina. “En cualquier área local, una especie no surge gradualmente por una continua transformación de sus antecesores; aparece de golpe y ‘totalmente formada’” (Gould, S. J., 1985).

S. J. Gould dice que, con N. Eldredge, piensan que en la especiación es en donde se debe buscar la inmensa mayoría de las transformaciones evolutivas. Según se desprende de las observaciones del registro fósil, la variación microevolutiva es lenta, de manera que las especies no presentan mayor transformación durante el tiempo de su existencia. No obstante y repentinamente, esa estabilidad se ve puntuada por súbitos procesos

de especiación (Gould, S. J., 2002). “La evolución es la supervivencia y despliegue diferencial de esas puntuaciones” (Gould, S. J., 1985).

La teoría de equilibrio puntuado parece explicar mejor los patrones de extinciones y de diversificaciones del registro fósil. Se observa que, por ejemplo, durante el llamado Fanerozoico se presentan unas ondas de extinción seguidas generalmente de cerca por una onda de diversificación. La onda de extinción del Cámbrico se acompaña de una elevada tasa de diversificación (Valentine, J. W., 1980).

Según S. J. Gould, se debe visualizar el proceso evolutivo dentro de una estructura jerárquica de dos niveles: uno es el de la macroevolución, y otro es el de la microevolución. En la microevolución se presenta un cambio en la evolución gracias al proceso de la mutación, en la macroevolución se presenta un cambio en una tendencia de tipo macroevolutivo gracias al proceso de la especiación. “De la misma forma que las mutaciones son aleatorias en relación con la dirección del cambio en el seno de una población, la especiación podría ser aleatoria en relación con la dirección de una tendencia macroevolutiva. Una forma de selección a un nivel superior, actuando directamente sobre las especies mediante tasas diferenciales de extinción, podría ser algo parecido a la selección natural operando en el seno de una población a través de la mortalidad diferencial de los organismos” (Gould, S. J., 1989).

1.4. *Una propuesta para el proceso de la evolución*

Si bien las tres anteriores teorías evolutivas podrían aparecer como irreconciliables para algunos de sus seguidores más ortodoxos, quisiera sugerir –desde una nueva propuesta para el proceso evolutivo– que no necesariamente debe ser así.

1.4.1. *Períodos de selección darwiniana o selección normal*

Durante la mayor parte del tiempo de su existencia, los organismos se adaptan a su medio ambiente según lo describía Darwin, y según lo confirman los neodarwinianos. Este proceso, efectivamente, será gradual y

continuo pero, como lo sostienen Eldredge y Gould, no habrá un cambio mayor en la estructura corporal de los organismos. Los organismos alcanzan así un alto grado de adaptación a su medio ambiente, habiendo asimilado respuestas adaptativas para las fluctuaciones previsible de aquel medio.

Como se sabe, se debe hablar de población específica y no de especie cuando nos estemos refiriendo a un grupo de organismos que comparten una región geográfica en la cual pueden, potencialmente, entrecruzarse entre sí (si se reproducen sexualmente o, simplemente, intercambian genes). Entonces, cuando la población específica se encuentra adaptada a su medio y a sus previsible fluctuaciones y se estabiliza, la presión selectiva comienza a bajar. Es entonces cuando comienzan a extenderse en la población variantes neutras, de manera que la población específica tendrá una alta variabilidad molecular, (como se desprendería de la propuesta neutralista, para los casos en que la presión selectiva es baja). Habrá una gran diversidad molecular -que pudiéramos llamar, diversidad microscópica- que no será percibida por la selección darwiniana. A nivel fenotípico –es decir, a nivel macroscópico- los organismos serán más o menos similares hasta donde lo permite la selección darwiniana. Sin embargo, a nivel microscópico reinarán las diferencias imperceptibles para la selección.

Durante todo este período que va desde que los organismos tienen algunos pequeños cambios morfológicos, hasta cuando este cambio, prácticamente, desaparece y cede al cambio microscópico molecular, actúa la selección natural o darwiniana. A estos períodos en que actúa la selección natural los llamaré períodos de selección normal, y los denominaré normal, porque esta selección es la que es admitida, normalmente, como tal, es decir, como selección.

1.4.2. *Períodos de selección invertida*

Aunque se admite que hay varios tipos de especiación, nosotros nos referiremos a las dos formas de especiación, consideradas como fundamentales: la alopátrica, y la simpátrica. La especiación alopátrica o geográfica (a la que se hizo referencia más arriba) consiste en la separación geográfica de

una población específica en dos o más grupos, con la consecuente divergencia genética y posterior aislamiento reproductivo. “En la especiación simpátrica, las formas nuevas aparecen en el seno del territorio geográfico de sus antecesores” (Gould, S.J., 1985). La especiación simpátrica era rechazada en un principio porque se consideraba que cualquier cambio en una subpoblación pronto será eliminado por la reproducción cruzada con los demás miembros de la población. Sin embargo, y como lo menciona Gould, la especiación simpátrica fue “... ganando tanto legitimidad como ejemplos” (Gould, S. J., 1985). Según veremos en nuestra propuesta evolutiva, la(s) nueva(s) especie(s) puede(n) originarse dentro de la gran población original, sin que el cambio sea eliminado por cruzamiento con los otros miembros de la población.

Una de las ideas centrales del darwinismo y del neodarwinismo es la de que los organismos se adaptan a su medio ambiente (nicho ecológico), y es este medio ambiente el que selecciona las variantes que mejor se le ajustan. El nicho ecológico existe independientemente del organismo. Desde esta perspectiva, si bien los organismos pueden transformar su medio ambiente (nicho ecológico), no lo crean. La propuesta que vengo sosteniendo desde hace ya varios años (Cadena, L. A., 1990, 1994, 1995), y que aquí desarrollaré y afinaré en mayor medida, es, precisamente, que los organismos crean, en un principio, sus nichos ecológicos. En estos períodos –relativamente cortos con relación a los períodos de selección normal-, los organismos crean, configuran, delimitan, seleccionan y sustituyen su medio ambiente (nicho ecológico). A estos períodos los he denominado períodos de selección invertida, debido a que la iniciativa selectiva corre por cuenta de los organismos.

Por la selección invertida, los organismos “deciden” con qué elementos del entorno pasarán ahora a interactuar. En la medida en que pasan a interactuar con un conjunto de elementos del entorno con los cuales no habían interactuado (además de los mismos elementos del entorno con los cuales continuarán interactuando), le dan unidad a todo ese gran conjunto (congéneres, otros organismos de determinadas poblaciones específicas, elementos no vivos, etc.), con lo cual crean el entorno con el cual pasarán a interactuar. Si esa selección invertida puede inscribirse en una tendencia de cambio más general, es decir, si la selección invertida

puede inscribirse en una selección normal más amplia, entonces, el proceso se invierte y es el nuevo medio ambiente (o nicho ecológico) recién creado el que pasa a seleccionar (selección normal) a aquellas variantes que mejor se le adaptan. Como ampliaremos después, la ruta de la selección invertida será establecida por los elementos más plásticos (o menos rígidos) de los organismos. De esta manera, y por la selección invertida, se ha creado una nueva y gran presión selectiva. Inicialmente, hay una sucesión de cambios estructurales abruptos y rápidos; luego, el cambio pasa a ser más pausado y lento y, finalmente, se alcanza un estado de cierta estabilidad en la estructura del organismo. Con relación al período de cambios abruptos que sigue a la selección invertida, este último período es bastante prolongado: la mayor parte de la existencia de los organismos en la tierra, no implica variaciones evolutivas fundamentales.

La propuesta de la selección invertida, y la necesidad de que esta selección pueda inscribirse en una selección normal más amplia, implicaría que la selección normal (o selección darwiniana) debería tener una naturaleza profundamente jerárquica: tendríamos un tipo de selección normal inscrito en otro proceso de selección normal más amplio y éste, a su vez, estaría inscrito en otro proceso de selección normal aún más amplio, y así sucesivamente. Esta idea de que habría diferentes niveles inscritos entre sí, debería ser acompañada de otra idea: para que la estructura jerárquica pudiera tener cierta estabilidad temporal, sería necesario que los niveles más amplios tuviesen una temporalidad o periodicidad cíclica mayor que la de los niveles inscritos en ella.

La selección normal o darwiniana no tiene por qué tener un único nivel, como lo sugiere el neodarwinismo. Por el contrario, una visión jerárquica del proceso evolutivo, y la sugerencia de que la selección invertida es la creadora de nuevos niveles jerárquicos, permiten presentar al mismo proceso evolutivo de una forma más dinámica, más rica en opciones y posibilidades de exploración de lo que piensan los neodarwinianos. Con la selección invertida y con una visión jerárquica del proceso evolutivo, podría explicarse fenómenos como la desaparición abrupta de todo un conjunto de niveles jerárquicos. Piénsese, por ejemplo, en el fenómeno de la neotenia. Por ésta, los organismos pueden perder una serie de estructuras ganadas en el proceso evolutivo, y pasar a estadios evolutivos

anteriores (hacerse más “jóvenes”) para abrir nuevas rutas evolutivas. La explicación de este fenómeno, dentro de la propuesta aquí presentada, sería la siguiente: una selección invertida logra inscribirse dentro de un nivel jerárquico mucho más amplio que los niveles jerárquicos en los cuales estaba inscrito el proceso evolutivo anterior. Con la articulación de la nueva selección invertida con el nivel mucho más amplio mencionado, se hacen innecesarios todos los niveles jerárquicos intermedios, obligando a su desaparición evolutiva.

Existen ejemplos conocidos en los reportes evolutivos de diversos organismos que confirman las propuestas aquí presentadas. Tomemos, por ejemplo, la evolución (basada en los molares) de los ancestros del actual caballo (*Hyracotherium* - *Mesohippus* - *Parahippus* - *Merychippus* - *Equus*). Según Maynard Smith, en la línea que conduce al *Neohipparion* se produjo una aceleración considerable en el ritmo evolutivo. “En otras líneas de descendencia surgidas del *Merychippus* se produce una considerable aceleración similar del ritmo, incluyendo la que lleva a los caballos, cebras y asnos del género *Equus* de nuestros días. ¿A qué obedece esta súbita aceleración del ritmo evolutivo? Hay pocas dudas a que obedeció a que el *Merychippus* y sus descendientes abandonaron el hábito, común a todos los caballos anteriores a él, de comer hojas, adoptando como principal fuente alimenticia las recién evolucionadas herbáceas. Otros linajes de caballos que, aun estando hoy en día extinguidos, sobrevivieron durante muchos millones de años junto con el caballo pastador, continuaron alimentándose de hojas y en ellos no se produjo un incremento en el ritmo de evolución de la forma de los molares” (Maynard Smith, 1984).

De otra parte, “los cambios más importantes en las extremidades de los caballos se refieren al mecanismo de los pies. Los caballos primitivos tenían pies funcionalmente similares a los del perro; presentaban cuatro dedos funcionales delanteros y tres traseros, que descansaban sobre unas almohadillas plantares blandas. En el transcurso del Oligoceno desapareció uno de los dedos delanteros, pero las almohadillas fueron conservadas. Este tipo de pata fue conservado por todos los caballos comedores de hojas subsiguientes. Un cambio dramático, bien documentado por abundantes fósiles, fue el producido en la línea *Parahippus-Merychippus*, antecesora de todos los caballos pastadores. Por medio de una serie de cambios

pequeños, si bien rápidos en una escala de tiempo evolutiva, un pie en el que los dedos de los almohadillos se apoyaban de plano sobre el suelo se transformó en uno, en el que el peso, en posición erguida, era sustentado por el extremo del dedo central. Al caer peso adicional sobre el pie durante el galope, el dedo central se veía doblado hacia delante, dando de sí a unos ligamentos elásticos del pie. La recuperación elástica subsiguiente de estos ligamentos ayudaba a levantar el animal del suelo al siguiente paso. Los dedos laterales fueron conservados, y actuaban como topes para evitar que los ligamentos se estiraran en exceso. Finalmente, en *Pliohippus* evolucionó el mecanismo del pie que hoy en día encontramos en los caballos; los dedos laterales quedan reducidos a vestigios, y su papel funcional de tope ha sido adoptado por ligamentos especiales.

‘El interés de esta historia radica en el hecho de que los cambios no se produjeron gradual y continuamente. Se sucedieron tres tipos de pie funcionalmente diferentes: el pie almohadillo de tres dedos, el pie para saltar de tres dedos y el pie saltador de un dedo, cada uno de los cuales persistió durante largos períodos de tiempo con pocos cambios; y la transición entre ellos se produjo rápidamente en líneas aisladas de descendencia. Cada tipo probablemente represente una mejora, para un mamífero galopador, con respecto a su predecesor. La rapidez en las transiciones entre ellos, no obstante, sugiere que los tipos intermedios de mecanismos habrían tenido una eficiencia menor; por consiguiente, la selección habría actuado en el sentido de preservar el mecanismo existente o, una vez traspasado determinado umbral, de perfeccionar con rapidez uno nuevo.

‘Las tendencias principales de la evolución de los caballos puede explicarse razonablemente como adaptaciones a una vida herbívora, producida por selección natural. Al producirse un cambio de hábitos entre los caballos pastadores, éste vino acompañado de rápidos cambios en la estructura de los pies y los dientes. En la medida en que toda una serie de linajes emparentados tienden a experimentar cambios evolutivos similares, esto obedece a que grupos de animales que adoptan modos de vida similares se ven sometidos a presiones selectivas similares.

‘La dirección del cambio evolutivo se ve determinada no sólo por el medio ambiente, sino también por la estructura existente del animal y

por sus hábitos y la utilización que hace de su medio ambiente [...] Allá donde se ha producido una inversión o un cambio en la dirección de la evolución, esta revela normalmente un cambio en el entorno en el que la población vive o, tal vez más a menudo, un cambio en los métodos de explotación de su medio ambiente” (Maynard Smith, 1984).

Se ha acudido a esta cita extensa de Maynard Smith, para confirmar los distintos elementos implicados en la propuesta que aquí se hace. Por supuesto, la línea de argumentación de Maynard Smith no es la misma que la sugerida más arriba. Lo que hacemos es reinterpretar los fenómenos evolutivos presentados por él en una nueva propuesta evolutiva. Veamos: Inicialmente, los organismos “deciden” con qué elementos del entorno pasarán a interactuar (los caballos “deciden” cambiar de hábitos alimenticios) y, en esa medida, crean su medio ambiente, o nicho ecológico. En este punto de nuestra argumentación, Maynard Smith dice que “...grupos de animales que adoptan modos de vida similares se ven sometidos a presiones selectivas similares”. Esto puede reinterpretarse como que son los organismos los que le confieren unidad a los elementos del entorno, creándolo y configurando –en consecuencia– la nueva presión selectiva. El medio ambiente no es el mismo para los distintos organismos, así compartan un mismo espacio físico: por ejemplo, el medio de los caballos que persistieron en comer hojas, es diferente del medio de los caballos que se alimentan de hierbas. De otra parte, si la selección invertida se inscribe en una selección más amplia, entonces, el proceso se invierte y es el nuevo medio ambiente recién creado el que pasa a ser el agente de selección (“al producirse un cambio de hábitos entre los caballos pastadores, éste vino acompañado de rápidos cambios en la estructura de los pies y los dientes”: los cambios en la estructura de pies y dientes pueden ser considerados, a su turno, como verdaderas selecciones invertidas que logran inscribirse dentro de la ya ahora selección normal del comer hierbas). El cambio de los organismos es, inicialmente, abrupto y rápido; luego los cambios se hacen prácticamente imperceptibles (los tres tipos de pies de los caballos persistieron por largos períodos de tiempo; sin embargo, la transición entre ellos se produjo rápidamente).

Tal vez, el descubrimiento más reciente que respalda la idea de que una selección invertida debe inscribirse en una selección más general, viene

del descubrimiento reciente de los llamados genes Hox u homeobox, que controlan el plan corporal de la inmensa mayoría de animales macroscópicos que conocemos. En el cámbrico hubo una gran explosión de diversidad que, con gran probabilidad, se debió a la aparición del grupo de genes, conocidos como homeobox u Hox, genes que controlan toda una batería de genes reguladores del plan corporal (Sampedro, J., 2002). Las “innovaciones” por selección invertida de los descendientes de la invención de los genes Hox, deberán, en adelante, inscribirse dentro de la dinámica de los mencionados genes.

Es necesario agregar un elemento adicional de nuestra propuesta: la selección invertida se efectúa por medio de los elementos menos rígidos del organismo, por ejemplo, el comportamiento de los animales (Repetiendo la cita de Mynard Smith, “allá donde se ha producido una inversión o un cambio en la dirección de la evolución, esta revela normalmente un cambio en el entorno en el que la población vive o, tal vez más a menudo, un cambio en los métodos de explotación de su medio ambiente”). Al respecto, decía E. Mayer: “... se ha demostrado que a menudo —o quizá siempre— la conducta es el marcapasos de la evolución. Un cambio en el comportamiento, la selección de un nuevo hábitat o fuente alimentaria, por ejemplo, desencadena nuevas presiones selectivas y puede conducir a importantes cambios adaptativos” (Mayer, E., 1979).

1.4.3. Anatomía del cambio evolutivo

1.4.3.1. Selección invertida y especiación simpátrica

En este punto, vamos a hablar de cómo es que se daría la selección invertida dentro de una gran población. Es decir, estaríamos adentrándonos en algunos aspectos de la especiación simpátrica. Habíamos mencionado que en el aquí llamado período de la selección normal que seguía a la selección invertida, los organismos cambiaban muy rápido, para estabilizarse, posteriormente su cambio durante largos períodos de tiempo. En estos períodos de cambios casi inexistentes, los organismos se encuentran muy adaptados a su medio ambiente y las presiones selectivas se relajan. Como bien lo advierten los neutralistas, es de esperarse que exista una gran diversidad a nivel molecular. Esta diversidad molecular

será completamente imperceptible desde el punto de vista de la selección normal: para ésta, estos organismos –tan diferentes microscópicamente- aparecerán macroscópicamente como similares. Este es el punto en el cual la especiación simpátrica parece ser rechazada por el argumento de que esas diferencias desaparecerían por la reproducción sexual. Sin embargo, las diferencias son imperceptibles selectivamente. No podrán desaparecer bajo el efecto homogeneizador de la reproducción sexual. Ellas persistirían. Y persistirán de la misma forma que persisten los genes mendelianos. Es bueno recordar que la persistencia de los genes mendelianos logró invalidar la “refutación” de la teoría de la selección natural por parte de la llamada teoría de los líquidos de F. Jenkin (Stebbins, G. L., 1980). Entonces, las variantes neutras persistirán (aunque algunas pueden desaparecer por deriva genética). Y aquí vendría la parte central de la argumentación que sigue: diferentes subconjuntos de esas variantes neutras podrían implicar, desde el nivel microscópico, diferentes entornos macroscópicos (o nichos ecológicos) posibles. Estos diferentes subconjuntos de variantes neutras surgirían aleatoriamente, en el sentido de que la conformación de estos subconjuntos no estaría inducida por algún medio preestablecido similar para todos ellos. En consecuencia, y desde el nivel microscópico, se estaría creando –silenciosa e imperceptiblemente para la selección normal reinante- nuevos medios ambientes (o nuevos nichos ecológicos). Entonces, y llamando a los diferentes subconjuntos mencionados selecciones invertidas, si alguna de estas selecciones invertidas logra inscribirse en una selección normal más general, se habrá configurado un nuevo medio (o un nuevo nicho ecológico) dentro de las mismas fronteras del anterior medio. Al configurarse un nuevo medio, de todos esos subconjuntos de combinaciones neutras, sólo aquel que logre inscribirse en una selección normal mayor sobrevivirá. Así, todo este proceso sería de azar y necesidad: de todos los posibles conjuntos de variantes neutras aleatoriamente surgidos, sólo sobrevivirá aquel que logre inscribirse en una selección normal mayor (este sería el eslabón necesario de este cambio evolutivo). En este punto, los organismos se encontrarán ante un “dilema” (que nada tendría que ver con una “consciencia” del dilema): o se quedan dentro de los márgenes de la selección normal preponderante hasta ese momento (“ortodoxa”), o se “arrojan” hacia la nueva presión selectiva (“novedosa”). La nueva presión selectiva obliga a un pronto aislamiento reproductivo de una fracción no despreciable

de organismos del resto de organismos. Esta nueva presión selectiva será capaz de percibir los pequeños cambios microscópicos, y rápidamente, y de manera jerárquica, conducirá a unos cambios morfológicos rápidos –estructuralmente hablando, de lo más “general” a lo más “particular”-, generando una especie totalmente formada y nueva.

1.4.3.2. La selección invertida y la especiación alopátrica

Partamos de una población específica relativamente grande y bien adaptada a su entorno en la cual, por efecto del relajamiento de las presiones selectivas, se ha extendido en la población, una gran variabilidad molecular neutra. Si por una u otra circunstancia (geográfica, por ejemplo), un grupo de organismos de esta población –que puede ser relativamente grande- se ve separado reproductivamente de la gran población de congéneres, entonces, estos organismos, otra vez desde el nivel molecular neutro, pueden configurar su nuevo entorno (selección invertida). Si se configura el nuevo entorno, y si esta selección invertida logra inscribirse en una selección normal más general, entonces, el proceso se invierte, y el nuevo medio (o nuevo nicho ecológico) seleccionará jerárquicamente las variantes que se le adaptan. De nuevo, los cambios morfológicos serán más o menos rápidos. Sin embargo, aquí podría suceder que los cambios no fueran tan rápidos como en el caso anterior. Y es en este punto es que se hace evidente una de las innovaciones del argumento de la selección invertida aquí sugerido: los diferentes medios (nichos ecológicos) compiten entre sí por “asociarse” con una buena fracción de la población específica. En consecuencia, la especiación simpátrica debería ser mucho más rápida que la especiación alopátrica: en la primera habría una competencia de medios, en tanto que en la segunda no habría –aparentemente- tal competencia. Esta aparente ausencia de competencia entre medios (o nichos) llevaría a que la presión hacia la especiación alopátrica fuese menor que en el caso simpátrico.

Lo interesante aquí será la afirmación de que no sólo los organismos compiten entre sí por adaptarse a un medio ambiente, sino que los diferentes medio ambientes (o nichos ecológicos) compiten entre sí por “asociarse” a una fracción de (sino a toda) la población específica. Esta propuesta de que los diferentes medios compiten entre sí indicaría

que ellos (los medios o nichos ecológicos) no pueden sobrevivir sin los organismos; son éstos quienes los crean: “Los organismos no sufren el ambiente de manera pasiva, sino que crean y definen el medio en el que habitan” (Lewontin, R., 1979). Es esa doble naturaleza de la selección y de la competencia, la que caracteriza la propuesta evolutiva que se hace: en una primera fase, los organismos crean y seleccionan su medio ambiente, y este medio ambiente recién configurado compite con el medio ambiente establecido por alguna fracción de la población de organismos. Luego el proceso se invierte: el, o los medios “supervivientes” pasa(n) a seleccionar las variantes que se le(s) adaptan. En esta fase, son los organismos los que compiten; aún en esta fase de selección normal, los organismos, mediante su actividad vital, continúan transformando su medio ambiente.

La competencia entre los diferentes medios por “apoderarse” de toda, o parte, de la población de organismos podría explicar el fenómeno recurrente de adaptaciones complementarias: un medio presionaría selectivamente al grupo de organismos a que desarrollase una característica o todo un conjunto de características) en mayor medida, mientras que el otro medio presionaría por ir debilitando la misma característica (o todo el conjunto de características). Esta complementariedad en el proceso evolutivo de estos dos grupos de organismos debería estar acompañada del proceso de aislamiento reproductor. Al estar adaptándose a diferentes medios, el aislamiento reproductor se haría inevitable y necesario: las formas intermedias resultarían, del todo, ineficaces debido a que no habría “nichos intermedios”.

2. La evolución orgánica y la complejidad

Las diferentes propuestas sobre la evolución orgánica podrían ser consideradas desde el punto de vista de los llamados sistemas complejos. Dentro de esta perspectiva, actualmente confluyen varios enfoques, de los cuales destacaremos los siguientes: las llamadas estructuras disipativas, la teoría del caos, la complejidad algorítmica o de Kolmogorov-Chaitin, y la complejidad computacional. Veamos, brevemente los elementos fundamentales de estos enfoques.

2.1. Algunos enfoques de la complejidad

2.1.1. Estructuras disipativas

Analizando sistemas termodinámicos sometidos a flujos de masa y de energía, es decir, sistemas abiertos, cerca del equilibrio, I. Prigogine llega a su famoso teorema de la producción mínima de entropía, para sistemas en estado estacionario. No entraremos en la demostración del teorema, pues es campo de algunos cursos de termodinámica, sino que nos concentraremos en sus puntos fundamentales. Supóngase que en un sistema se presentan flujos (J) de masa y energía impulsados por sus fuerzas (X) correspondientes, con el consecuente acoplamiento de estos flujos. Si una de estas dos fuerzas (X_1) se hace constante debido a ligaduras externas, su flujo conjugado (J_1) se hace constante; en estas condiciones, la otra fuerza (X_2) evoluciona hasta hacerse constante, y su flujo conjugado se anula ($J_2 = 0$). Llamando \dot{S} a la producción de entropía (es decir, $d_i S/dt$), se puede demostrar que $\left(\frac{\partial \dot{S}}{\partial X_2}\right)_{X_1} = 0$; como la segunda derivada es,

$$\left(\frac{\partial^2 \dot{S}}{\partial X_2^2}\right)_{X_1} > 0, \text{ entonces, la producción de entropía pasa}$$

por un mínimo. Generalicemos a n fuerzas independientes, X_1, \dots, X_n , k de las cuales (X_1, \dots, X_k) permanecen constantes: si en estas condiciones se presenta una producción mínima de entropía, los flujos restantes J_i , ($i = k+1, k+2, \dots, n$) son nulos y el sistema, eventualmente, alcanza el estado estacionario (Aguilar, J., 1984).

El teorema anterior es válido en la región cercana al equilibrio termodinámico. Sin embargo, para la región alejada del equilibrio es necesario realizar un análisis más. Regresando a un eslabón anterior al del teorema de Prigogine, se tendría que:

$$\frac{d_i S}{dt} = \dot{S} = \sum_{\rho} J_{\rho} X_{\rho} \geq 0. \quad \text{En consecuencia,}$$

$$\frac{d\dot{S}}{dt} = \sum_{\rho} X_{\rho} \frac{\partial J_{\rho}}{\partial t} + \sum_{\rho} J_{\rho} \frac{\partial X_{\rho}}{\partial t} = \frac{d_f \dot{S}}{dt} + \frac{d_x \dot{S}}{dt}$$

De aquí se llega a que $\frac{d_x \dot{S}}{dt} \leq 0$, lo que permite demostrar que

$\sum_p \delta J_p \delta X_p \geq 0$ en donde, δJ_p , y δX_p , son los excesos de flujos y fuerzas que indican el alejamiento del equilibrio, y δ indica un incremento pequeño, pero arbitrario. Esta última desigualdad es el criterio de estabilidad para sistemas alejados del equilibrio. Si se llama $\delta^2 S$ exceso de entropía, entonces, la probabilidad de que se presente una fluctuación al rededor del estado de referencia es:

$$P \propto e^{-\left(\frac{\delta^2 S}{2k}\right)}$$

en donde k es la constante de Boltzmann. Es decir, para sistemas con muchos grados de libertad, la probabilidad de una fluctuación alrededor del estado de referencia no es despreciable (Glansdorff, P. and Prigogine I., 1971, Prigogine, I., et al, 1972). De esta forma, un sistema con muchos grados de libertad, cuyo estado promedio se encuentra cerca, pero debajo del umbral crítico de inestabilidad, puede tener siempre una probabilidad no despreciable de alcanzar la región inestable a través de fluctuaciones. Si esto llegase a ocurrir, alguna fluctuación podrían amplificarse llevando al sistema a un nuevo régimen. Aparece, entonces, un nuevo principio de orden originado en la amplificación de la fluctuación, la cual es estabilizada por flujos de energía y de materia. A este proceso se le podría llamar orden a través de fluctuaciones. “La formación de una fluctuación de un tipo dado es fundamentalmente un proceso estocástico. La respuesta del sistema a esta fluctuación es un proceso determinístico que obedece a leyes macroscópicas mientras que el sistema pueda asimilar las fluctuaciones” (Prigogine, I., et al, 1972). La fluctuación amplificada y estabilizada por flujos de energía y de materia se llama estructura disipativa. La denominación de estructuras disipativas se debe a que el mantenimiento de la estructura disipativa requiere de cierta distancia crítica al equilibrio, lo cual implica un nivel mínimo de disipación (Glansdorff, P. and Prigogine I., 1971).

2.1.2. Teoría de caos

Hacia 1960 el meteorólogo Eduard Lorenz, tratando de predecir el estado del tiempo, efectuó un cálculo (accidentalmente), de dos formas

diferentes: una teniendo en cuenta tres cifras, y otra teniendo en cuenta seis cifras decimales. Los resultados del cálculo eran semejantes en los primeros eslabones del cálculo. Sin embargo, en etapas posteriores, los resultados divergían cada vez más. Este era algo inesperado desde el punto de vista de la ciencia de la época: si se partía de unos datos que difirieran desde la cuarta cifra decimal, era de esperarse que los resultados de los cálculos en posteriores etapas se mantuvieran aproximadamente juntos (Gleick, J., 1998). El problema residía en que Lorenz, para la predicción del tiempo, había acudido a ecuaciones no lineales, irreductibles a ecuaciones lineales. Esto hacía que las trayectorias del tiempo pudieran divergir cada vez más al tenerse datos de entrada que diferían en algunas de sus cifras decimales.

Supóngase (Fernández-Rañada, A., 1990) que se tiene un sistema dinámico discreto cuyo comportamiento (por ejemplo, número de individuos de una población específica de un ecosistema), sigue la siguiente ecuación: $X_{n+1} = b(1 - X_n)$, en donde x_n es el valor de la función en la fase n , mientras que x_{n+1} es el valor de la función en la fase $n + 1$. De otra manera, x_n es el dato de entrada, y x_{n+1} es el dato de salida en un proceso de cálculo iterado; b es un parámetro tal que $1 < b < 4$. Por otra parte, x_{n+1} y x_n pueden tener valores entre 0 y 1. Para valores pequeños del parámetro b , se tiene que después de algunas oscilaciones, se tiende a un valor único y constante, independientemente de cuál sea el dato original de entrada x_0 . En este caso, si el valor de x_n es menor que el valor x^* , en las siguientes etapas de cálculo, $x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3}, \dots$, el valor de de x_i tenderá a aumentar hasta x^* . Por el contrario, si el valor de x_n es mayor que el valor x^* , en las siguientes etapas de cálculo, $x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3}, \dots$, el valor de de x_i tenderá a disminuir hasta x^* . Si llamamos trayectoria al comportamiento de x_i en las sucesivas etapas de cálculo, se tendrían diferentes trayectorias para distintos valores originales x_0 . No obstante, todas las trayectorias convergerán en x^* . Como x^* pareciera atraer a todas las trayectorias, se le llamará a x^* atractor.

Si b aumenta un poco, entonces, x^* aumentará también. Sin embargo, si b aumenta más allá de 3, $b_1 = 3$, las diferentes trayectorias podrían tender, esta vez, hacia dos valores, x_1^* y x_2^* , es decir, las trayectorias podrían oscilar entre los dos valores referidos. En este caso, se dice que la trayectoria se ha bifurcado hacia los dos valores x_1^* y x_2^* .

Si b aumenta por encima de $b_2 = 3.449$, entonces, las trayectorias se bifurcarán de nuevo hacia cuatro valores diferentes, es decir, las trayectorias oscilarán entre los cuatro valores aludidos: irán sucesivamente de uno a los otros tres valores, volviendo al ciclo de cuatro valores una y otra vez. Así sucesivamente, se podrán encontrar valores b_n tales que las trayectorias se bifurquen consecutivamente y tiendan a un ciclo de valores 2^n . A pesar de que 2^n puede ser relativamente grande, todas las trayectorias tenderán al comportamiento cíclico de oscilar entre los 2^n valores, y el comportamiento del sistema será predecible.

Si b supera el valor crítico $b_c = 3.569945\dots$, las trayectorias recorrerán una creciente y cada vez más rápida sucesión de bifurcaciones y pasarán a comportarse caóticamente, es decir, tomarán valores entre 0 y 1, sin poderse reconocer alguna pauta a pesar del número de iteraciones en el cálculo que se tengan. En un sistema de comportamiento caótico, por más que dos valores originales estén muy próximos, sus trayectorias divergirán (Fernández-Rañada, A., 1990). A esto se le suele llamar sensibilidad a las condiciones iniciales, debido a que una pequeñísima diferencia en el punto de partida llevará trayectorias completamente diferentes.

Como los estados posibles de un sistema no pueden ser infinitos, entonces, las trayectorias no pueden divergir por siempre, lo cual hace que el atractor deba ser finito. En consecuencia, el atractor caótico tiene que plegarse sobre sí mismo una y otra vez, creando pliegues dentro de pliegues a la manera de un fractal (Crutchfield, J. P., et al, 1990). Esta necesidad de que el atractor caótico tenga una dimensión fractal queda ilustrada por la idea de las sucesivas y cada vez más rápidas bifurcaciones que precipitan al comportamiento caótico: si se amplifica la región caótica, se verán ventanas de bifurcaciones en las cuales el comportamiento se hace, otra vez, predecible; sin embargo, el comportamiento vuelve a ser caótico un poco más adelante. Otra vez, si se amplifica esta región caótica “microscópica”, se observarán, de nuevo los comportamientos predecibles junto con los comportamientos caóticos impredecibles. Y así sucesivamente se va repitiendo este mismo patrón a lo largo de todas las amplificaciones. Esta autosimilitud o invarianza frente a los cambios de escala es una de las características de los fractales (Sander, L., 1990).

Crutchfield et al (1990) sugieren que la teoría del caos se aparta de la ciencia tradicional reduccionista que supone que el comportamiento de un sistema puede ser analizado por medio del comportamiento de todos sus elementos constituyentes. Esto es cierto en sistemas lineales; sin embargo, en sistemas en los cuales sus elementos presenten interacciones no lineales, aquella posibilidad reduccionista se esfuma: un sistema de unos pocos componentes con interacciones no lineales entre ellos puede llevar al caos. A pesar de que la teoría del caos se aleja del reduccionismo, esto no impide que el caos sea determinista: “Una aparente paradoja es que el caos es determinista, generado por reglas fijas que no encierran ningún elemento de azar. En principio, el futuro está enteramente determinado por el pasado, pero en la práctica las pequeñas incertidumbres se agrandan, de suerte que, si bien el movimiento es predecible a corto plazo, no lo es a largo plazo” (Crutchfield J. P., et al, 1990).

2.1.3. Complejidad algorítmica

La teoría de la complejidad algorítmica surge de tres caminos, aparentemente desligados: la búsqueda de un modelo para el razonamiento inductivo (R. J. Solomonoff, 1964), la aproximación algorítmica al contenido de información de un objeto individual (A. N. Kolmogorov, 1965) y la búsqueda de una relación entre las funciones parciales recursivas con los programas de computador, por medio de la teoría de la información y de la codificación (G. Chaitin, 1966, 1969). Esta teoría se consolidó con la introducción del concepto de los programas auto-delimitantes (G. Chaitin 1975, 1990).

Un programa de computador (o máquina de Turing) auto-delimitante (o instantáneo) es un programa que contiene información sobre su longitud, de manera que el computador puede reconocer dónde comienza y dónde termina el programa. Con este tipo de programas se evita la ambigüedad de programas no auto-delimitantes. A continuación, se indican las definiciones fundamentales de la teoría de la complejidad algorítmica, recurriendo -principalmente- a la presentación de G. Chaitin (1975, 1990).

Definición concreta de computador. El computador C es una máquina de Turing que tiene dos cintas: una cinta programa (sobre ésta va una

cabeza lectora que se mueve hacia la derecha únicamente) con el primer cuadro en blanco, y los demás con ceros o unos; esta cadena binaria es el **programa, p**. La segunda cinta es la llamada cinta de trabajo, que contiene una pequeña cadena binaria q escrita en ella; los demás de cuadros están en blanco. Sobre esta cinta (teóricamente infinita hacia izquierda y hacia derecha) va una cabeza lecto-escritora que puede moverse a izquierda o derecha, y que lee, escribe o borra.

Si la máquina se detiene, $C(p, q)$ será el resultado de la computación (output), si no se detiene, $C(p, q)$ no está definida. p y q son cadenas binarias.

Definición abstracta de computador. Un computador es una función parcial recursiva $C: X \times X' \rightarrow X$, con la propiedad de que para cada q , el dominio de $C(\cdot, q)$ es un código instantáneo. X es el conjunto de cadenas binarias finitas, incluyendo la cadena binaria vacía, ordenadas lexicográficamente: $X = \{\Lambda, 0, 1, 00, 01, \dots\}$.

Las dos definiciones anteriores de computador son equivalentes.

Definición de un computador universal óptimo. U es un computador universal óptimo si para cada computador C , existe una constante $\text{sim}(C)$ tal que, si $C(p, q)$ está definida, entonces, existe un p' , tal que

$$U(p', q) = C(p, q) \quad \text{y} \quad |p'| \leq |p| + \text{sim}(C).$$

Mediante la notación $|p|$, se indica la longitud de la cadena binaria programa o número de bits de p . En ocasiones, esta longitud se representa por $l(p)$. $\text{sim}(C)$ es una constante que indica el número de bits que preceden a los bits de p , en la codificación auto-delimitante de p : $1^{|p|}0ip$. Esta nomenclatura indica que la codificación auto-delimitante de p se efectúa mediante la escritura de tantos unos como longitud tenga el número índice con el que se especifica el programa, seguido por un cero separador, seguido por el índice escrito de forma binaria, seguido finalmente por el programa. p' es la mencionada codificación auto-delimitante de p .

El computador universal óptimo puede imitar cualquier otro computador. Efectúa el mismo cálculo de cualquier otro computador. La única di-

ferencia consiste en el prefijo -en el computador universal- $1^{ii}0i$, que es, relativamente corto, pues sólo implica $(2|i| + 1)$ bits. En general, el programa p tendrá un número de bits mucho mayor que el número de bits de este prefijo.

Para los desarrollos que vienen a continuación, se tomará un computador universal óptimo específico, U , como patrón.

Programa canónico: $s^* = \min p (U(p, \Lambda) = s)$. s^* es el programa de longitud mínima que permite calcular la cadena binaria s (en el computador universal U), estando la cinta de trabajo completamente en blanco. Si existe más de un programa para calcular s (todos con la misma longitud), el programa canónico será el primero de los programas ordenados lexicográficamente.

Definiciones de complejidad:

$$K_c(s) = \min |p| (C(p, \Lambda) = s) , \text{ puede ser } \infty$$

$$K_c(s/t) = \min |p| (C(p, t^*) = s) , \text{ puede ser } \infty$$

$$K(s) = K_U(s).$$

$$K(s/t) = K_U(s/t).$$

La primera definición de complejidad, $K_c(s) = \min |p| (C(p, \Lambda) = s)$, se lee: la complejidad de la cadena binaria s , según el computador C , es el número de bits del programa p de menor longitud tal que C , con la cinta de trabajo en blanco, y con el programa p , calcula s .

La segunda definición de complejidad, $K_c(s/t) = \min |p| (C(p, t^*) = s)$, se refiere a la complejidad de la cadena binaria s , según el computador C , teniendo en la cinta de trabajo el programa canónico de la cadena binaria t .

Cuando se define $K(s) = K_U(s)$, o $K(s/t) = K_U(s/t)$, se indica que la complejidad de la cadena binaria s es la estimada por medio del computador universal.

El teorema siguiente indica la máxima complejidad de una cadena binaria finita:

$$\text{máx } K(s)(|s| = n) = n + K(n) + O(1).$$

La máxima complejidad de una cadena binaria finita es aproximadamente igual al número de bits de esa cadena binaria, más el número de bits del programa mínimo que permite calcular el natural n escrito de forma lexicográfica. El término $K(n)$ se debe, precisamente, a que los programas auto-delimitantes contienen, codificada, información sobre su propia longitud, como habíamos mencionado. El término $O(1)$ es una constante del orden de la unidad. Con base en este teorema, se puede afirmar que una cadena binaria s es aleatoria si $K(s)$ es aproximadamente igual a $|s| + K(|s|)$. Si s es una cadena binaria de longitud n , y si $K(s) \geq n$, entonces, s es incompresible.

Supóngase que se tienen dos cadenas binarias así: primera cadena binaria: 00000000000000000000, segunda cadena binaria: 01000010011101100010. La primera cadena binaria tiene una pauta que se reitera, entonces, puede comprimirse en un programa de computador más corto que ella, por ejemplo, el programa diría “escriba 0 20 veces”. La segunda cadena binaria no puede comprimirse en un programa más corto. Entonces, el programa de computador para esta segunda cadena binaria diría: “escriba 01000010011101100010”. Diremos que la primera cadena binaria es ordenada y poco compleja, en tanto que la segunda cadena binaria es aleatoria y tiene una máxima complejidad (dada su longitud). Es decir, cadenas binarias ordenadas se pueden comprimir en programas cortos, en tanto que cadenas binarias aleatorias no se pueden comprimir en programas más cortos que ellas.

2.1.4. Complejidad computacional

Definición (Li, M., and Vitányi, P., 1997):

Sea T una máquina de Turing. Para cada entrada (input) de longitud n , si T realiza, al menos, $t(n)$ movimientos antes de que se detenga, entonces,

decimos que T ejecuta en un tiempo $t(n)$, o que tiene una complejidad de tiempo $t(n)$. Si T usa, al menos, $s(n)$ espacios en el referido cálculo, entonces, decimos que T usa un espacio $s(n)$, o que tiene una complejidad de espacio $s(n)$.

Un resultado fundamental es el siguiente: cualquier máquina de Turing de k -cintas, ejecutando en un tiempo $t(n)$ puede ser simulada por una máquina de Turing con sólo una cinta de trabajo ejecutando en un tiempo $t^2(n)$. Cualquier máquina de Turing usando un espacio $s(n)$ puede ser simulada por una máquina de Turing con sólo una cinta de trabajo usando un espacio $s(n)$. Para cada k , si un lenguaje es aceptado por una máquina de Turing de K cintas ejecutando en un tiempo $t(n)$ (espacio $s(n)$), entonces, ese lenguaje puede ser aceptado, también, por otra máquina de Turing de k cintas ejecutando en un tiempo $ct(n)$ (espacio $cs(n)$).

2.2. *Evolución y complejidad*

Intuitivamente se dice que los seres vivos son sistemas complejos y que el proceso de evolución es, también, complejo. A continuación presentaré la propuesta evolutiva sugerida arriba, acudiendo al lenguaje de los enfoques de la complejidad aquí presentados.

Se sugería que en cierta etapa del proceso evolutivo de una población específica se podría haber acumulado una gran variabilidad genética neutra, imperceptible para el medio o nicho ecológico de esa población. Subconjuntos del total de variaciones neutras pueden ser fluctuaciones microscópicas del sistema (alejamientos del estado de referencia, el cual estaría constituido por la población establecida). Si el nuevo medio o nuevo nicho se configura, es decir, si la selección invertida que está implícita en cada subconjunto de variantes neutras logra inscribirse en una selección normal más general (con lo cual se atraviesa un umbral crítico de inestabilidad), la fluctuación o subconjunto de variantes neutras, se amplificará: el nuevo medio presionará para que la nueva población se aisle reproductivamente de la población ya establecida. El aislamiento evolutivo llevará a una serie de transformaciones evolutivas rápidas, con lo cual queda completada, en un tiempo relativamente breve, la amplificación de la fluctuación. De esta manera, el proceso de formación

de una nueva especie, tal vez, pueda ser interpretado como un proceso autoorganizativo de formación de una estructura disipativa.

Si se estuviera dando paso a dos nuevas poblaciones específicas, con sus respectivos medios o nichos ecológicos, estas dos poblaciones en formación, macroscópicamente serían semejantes, en tanto que microscópicamente diferirán en su respectivo conjunto de genes neutros. Diríamos que cada población específica en formación es una fluctuación, o desviación del estado de referencia (o población establecida). Entonces, con la amplificación de las dos fluctuaciones, las dos trayectorias evolutivas correspondientes a estas dos poblaciones en formación divergirán cada vez más, lo que podría indicar que estas trayectorias evolutivas estarían gobernadas por un atractor caótico. Finalmente, con la subsiguiente estabilización de las trayectorias evolutivas, el atractor caótico cederá su influencia a dos atractores no caóticos. En este caso, el proceso de origen de una, o de algunas especies nuevas, podría pasar por ciertos períodos de comportamiento caótico, el cual cederá ante un nuevo comportamiento no caótico en la formación de la, o las especies nuevas. Debido a que las trayectorias evolutivas de las especies en formación divergirán cada vez más desde lo microscópico a lo macroscópico, el proceso de formación de las nuevas especies podría presentar una sensibilidad a las condiciones iniciales: pequeñas diferencias microscópicas llevarán a dos especies diferentes desde el punto de vista macroscópico.

2.3. *Complejidad y vida: algunas reflexiones*

2.3.1. *Evolución y estructuras disipativas*

La propuesta del modo cómo operaría la evolución aquí presentada parecería, en primera instancia, tener ciertas similitudes con algunos de los elementos conceptuales de las teorías de las estructuras disipativas y del caos, según se vio en el anterior apartado. Sin embargo, antes de dar por cierto que el origen de nuevas especies es un proceso de formación de estructuras disipativas y -en ciertos momentos- un proceso caótico, es necesario hacer algunas reflexiones. Veamos, en primer lugar, el caso de las estructuras disipativas.

Se sugería que los distintos posibles subconjuntos de variables neutras podrían ser considerados como fluctuaciones alrededor del estado de referencia (la población específica establecida). En este caso debería poder especificarse qué serían los grados de libertad de la población de referencia (quizá el número de variables neutras, pero esto debería ser analizado en profundidad), debería precisarse qué es el “estado” de referencia (y no sólo referirse a él, simplemente, como la población establecida), es decir, deberían resolverse los siguientes interrogantes: ¿qué es el “estado” de la población específica establecida? ¿Puede hablarse de “estado” de la población establecida en el sentido de un estado de un sistema físico, o se estaría haciendo una analogía o una simple metáfora? Si estos interrogantes se solucionaran favorablemente hacia la dirección de presentar la evolución como un proceso de formación de estructuras disipativas, habría que aclarar en qué sentido se puede hablar de fluctuación alrededor del estado de referencia, y ver si en sistemas biológicos con muchos grados de libertad la probabilidad de una fluctuación no es despreciable.

Por otro lado, sería importante aclarar qué serían los flujos y las fuerzas en los organismos: ¿Serían únicamente y respectivamente derivadas de cantidades extensivas con respecto al tiempo y derivadas de cantidades intensivas con respecto a una coordenada? ¿Qué serían variables intensivas y extensivas en las poblaciones en evolución? ¿Simplemente las mismas de los sistemas termodinámicos?

¿Es tan crucial el comportamiento de la entropía de los organismos en evolución, como en los sistemas termodinámicos abiertos alejados del equilibrio?

Supóngase que se muestra convincentemente que los conjuntos de variantes neutras puedan ser interpretados como fluctuaciones alrededor del estado de referencia. Como las diferencias microscópicas, dadas por la variabilidad genética, bajo ciertas circunstancias, pueden llevar a una nueva especie, entonces, ¿puede tenerse a la especiación como un proceso de amplificación de una fluctuación?

Finalmente, ¿la estabilización de una población específica nueva, corre por cuenta, únicamente, de flujos de masa y de energía desde el medio?

¿Cómo “reinterpretar” evolutivamente esos flujos?

Se debería resolver seriamente los anteriores interrogantes antes de adentrarse en la posibilidad de considerar el proceso evolutivo como un proceso de construcción de estructuras disipativas.

2.3.2. *Evolución y caos*

Como lo mencionamos, y al igual que en el caso de las estructuras disipativas, algunos fenómenos presentados en la propuesta evolutiva aquí sugerida, parecieran tener una fuerte similitud con algunos de los fenómenos de los sistemas de comportamiento caótico. ¿Son algunos procesos de la evolución de los organismos caóticos?

Generalmente, en los sistemas de comportamiento caótico, este comportamiento depende de ciertos valores de un parámetro que permite la descripción del estado del sistema en el espacio de los estados. Dentro de ciertos valores de este parámetro, el estado del sistema presentará un comportamiento caótico. Con respecto a esto ¿puede “reducirse” el comportamiento de un organismo en evolución a la variación de un parámetro? Un organismo está constituido por muchos componentes que interactúan de manera más o menos no lineal (en algunos casos, la interacción puede ser lineal) ¿puede “reducirse” el organismo a uno o unos pocos parámetros que, para ciertos valores, puedan implicar que el estado del sistema se comporta caóticamente? ¿Cómo mostrar convincentemente que, en los primeros estadios de formación de dos o más especies, su trayectoria evolutiva está gobernada por un atractor caótico-fractal?

Si se quiere afirmar que sistemas complejos –como lo serían los organismos– son aquellos que presentan un comportamiento caótico, fácilmente podríamos encontrar que esta afirmación no es del todo cierta: muchos de los sistemas en los cuales se considera que, bajo ciertas circunstancias, alcanzan un estado caótico, son muy simples. Por ejemplo y bajo ciertas condiciones, la sucesión de gotas de un grifo mal cerrado puede alcanzar un comportamiento caótico (Crutchfield, J. P., et al, 1990). Esto no podría significar que ese sistema (el grifo mal cerrado, y la sucesión de gotas) pueda ser considerado como un sistema complejo.

Si el proceso de evolución es un proceso caótico ¿cómo podría explicarse, desde este punto de vista, que grandes grupos de organismos compartan un plan corporal que se reitera a través de diferentes eras geológicas? Según los referidos genes Hox, podríamos decir que las trayectorias evolutivas de estos organismos están atrapadas dentro de este plan corporal, y no pueden alejarse de ese plan. Las trayectorias evolutivas de los animales de simetría bilateral, a pesar de las grandes diferencias entre ellos, no divergen tanto como se creía antes del descubrimiento de estos genes Hox. En consecuencia, las trayectorias evolutivas de la gran mayoría de los animales macroscópicos, no divergen de manera caótica.

Finalmente habría que decir lo siguiente: en el proceso evolutivo, según la propuesta, se da una alternancia de procesos selectivos entre los organismos y el medio ambiente ¿cómo asimilaría la teoría del caos esta alternancia? ¿Cómo asimilaría el caos el importante papel del medio en los períodos de selección normal?

Todos estos problemas deben ser afrontados con el cuidado necesario, antes de asumir que un sistema es complejo si su comportamiento, en determinadas fases, resulta ser caótico.

2.3.3. *Sistemas complejos, complejidad algorítmica y complejidad computacional*

Si consideramos a los seres vivos como sistemas complejos, creemos que debemos ir más allá de pensar que su complejidad estaría dada por un comportamiento caótico. Esto no es necesariamente así, según se vio.

Por otro lado, si nos acercamos al concepto de estructura disipativa ¿qué criterio de este enfoque nos permitiría hablar de que un sistema es más “complejo” que otro? El alejamiento del equilibrio no es una característica de su “complejidad”, pues podría haber sistemas alejados del equilibrio sin ser muy complejos. La disipación tampoco podría ser el criterio: sistemas (intuitivamente) poco y muy complejos pueden tener el mismo grado de disipación. C. Bennett (1990) había hecho caer en cuenta que algunos sistemas pueden alcanzar estados triviales a través de mucha disipación, y que otros sistemas pueden alcanzar estados no triviales a través de una disipación menor.

En nuestra opinión, si partimos de una noción intuitiva de sistema complejo (como lo sugieren varios investigadores, entre ellos el citado C. Bennett), y a pesar de las dificultades que existen en estas teorías según veremos, debemos seguir explorando la posibilidad de encontrar definiciones de complejidad dentro de la perspectiva de las teorías de la complejidad algorítmica y la complejidad computacional.

Por la complejidad algorítmica diríamos que un sistema es complejo si la longitud del programa computacional mínimo que permite llegar a una descripción computacional apropiada del sistema, no es mucho más corta que el modelo computacional del sistema. Y un sistema será poco complejo si la descripción computacional adecuada del sistema puede comprimirse en programas mucho más cortos que ella. La dificultad que surge inmediatamente desde el punto de vista de la complejidad algorítmica, es la siguiente: un gas de Boltzmann sería más complejo que un organismo modelado computacionalmente, lo cual no estaría de acuerdo con nuestra noción intuitiva de complejidad. Solemos llamar sistema complejo aquel conjunto de sistemas que se encuentran en el medio de dos extremos: por un lado, los sistemas “desordenados” como el gas de Boltzmann, y los sistemas completamente “ordenados”, como los cristales puros. En consecuencia, se debería buscar una definición y una medida de complejidad, basada en la complejidad algorítmica para esta zona “intermedia” de los sistemas que intuitivamente son complejos (los seres vivos, por ejemplo).

La complejidad algorítmica tiene, todavía, otra dificultad: no es, en sí misma, una función recursiva (es decir, una función calculable por una máquina de Turing o computador), en consecuencia, para la mayoría de las cadenas binarias no es posible encontrar el programa mínimo (Badii, R. and Politti, A., 1999). Esta dificultad fue tratada de resolver por C. Bennett (1988) con su definición de profundidad lógica. Según esta definición, los sistemas intuitivamente complejos presentarán una profundidad lógica mayor que los sistemas (intuitivamente) poco complejos. M. Li y P. Vitányi (1997), formalizando un poco más que su propio autor la definición y teoremas de la profundidad lógica, dicen que ésta es el número de pasos en una trayectoria causal o deductiva que conecta el objeto (sistema complejo) con su origen más probable. Más formalmente, la profundidad lógica es el tiempo requerido por un

computador universal para calcular el objeto a partir de una versión original comprimida.

A pesar de las dificultades de las diferentes teorías a las cuales nos hemos estado refiriendo, creemos que no por ellas se las debe descartar de un plumazo en el papel que puedan tener en la perspectiva de tener la evolución y los seres vivos como procesos y sistemas complejos. Muy por el contrario, lo que aquí se sugiere es evitar que analogías fáciles lleven al desprestigio intelectual de las propuestas de la complejidad. Tal vez, lo más recomendable sea afinar la autocrítica cuando se perciban ciertas similitudes entre los procesos de evolución y la vida (incluso, la cultura), por un lado, y las diferentes teorías sobre los llamados sistemas complejos, por el otro lado. Todavía no se ha llegado a mostrar, convincentemente, que existe una teoría unificada de los llamados sistemas complejos. Tampoco se ha mostrado, de forma suficientemente persuasiva, que únicamente es posible formular definiciones de complejidad válidas para conjuntos restringidos de sistemas (Cadena, A., 2003, 2005). No obstante, eso no significa que se deba caer en la propuesta prohibitiva que sostiene que se debe abandonar el camino de la complejidad. El que no se haya llegado a mostrar la validez uno de los dos caminos de la complejidad (la universalidad o la restricción), no debe llevar al bloqueo de la investigación en tal campo. Sin caer en alguno de los extremos algo místicos (1. la teoría de la complejidad es la nueva visión de la naturaleza; 2. la teoría de la complejidad es un fraude), se debe continuar en el empeño de proponer nuevas definiciones de complejidad, y de analizar cuál puede ser el alcance de estas definiciones en distintos procesos y sistemas. Por ejemplo, la evolución y la vida.

Bibliografía

Aguilar, J., (1984). Curso de termodinámica. 2ª ed. Madrid: Editorial Alhambra, S. A.

Ayala, F., (1979). Mecanismo de la evolución. En Evolución, Libros de Investigación y Ciencia. Barcelona: Editorial Labor, S. A.

Ayala, F., (1980). Estructura genética de las poblaciones. En *Evolución*, Dobzhasky, Th., Ayala, F., Stebbins, G. L. y Valentine, J. W. Barcelona: Ediciones Omega, S. A.

Badii, R. y Politi, A., (1999). *Complexity, hierarchical structures and scaling in physics*. Cambridge: Cambridge University Press. First paperback edition (with corrections).

Bennett, C., (1988). Logical depth and physical complexity. En R. Herker editor, *The universal Turing Machine: a half century survey* (227-258). Oxford University Press.

Bennett C., (1990). How to define complexity in physics, and why, en *Complexity, and the Physical of Information* (137-148). Adisson-Wesley.

Cadena, L. A., (1990). De Empédocles y Darwin hacia una teoría generalizada del conocimiento. Tesis. Bogotá, D. C., Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Biología.

Cadena, L. A., (1994). Ni holismo ni reduccionismo: azar y necesidad. En *memorias del Seminario Nacional El Quehacer Teórico y Las Perspectivas Holista y Reduccionista*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Bogotá D. C.: Colección Memorias No. 1.

Cadena, L. A., (1995). Selección y neutralidad ¿Antagónicas? *Innovación y Ciencia*, IV (1): 26-31.

Cadena, L. A., (2003). Sobre la “complejidad” de un gas perfecto en un campo de gravedad constante, *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, 4 (8-9): 7-26.

Cadena, L. A., (2005). Sobre una nueva definición de complejidad, en *Complejidad de la Ciencia y Ciencias de la Complejidad*. Bogotá, D. C.: Serie Pretextos, No. 27 (121-144), Universidad Externado de Colombia.

Crutchfield, J. P., Farmer, J. D., Packard, N. H., y Shaw, R., (1990). *Caos. En Orden y Caos*. Barcelona: Prensa Científica, S. A.

Chaitin, G., (1966). On the length of programs for computing finite binary sequences. *J. Assoc. Comput. Mach.*, 13: 547-569.

Chaitin, G., (1969). On the length of programs for computing finite binary sequences: statistical considerations. *J. Assoc. Comput. Mach.* 16: 145-159.

Chaitin, G., (1975). A theory of program size formally identical to information. *J. Assoc. Comput. Mach.*, 22 (3): 229-340.

Chaitin, G., (1990). *Algorithmic information theory*. 3ª ed. Cambridge: Cambridge University Press.

Darwin, Ch., (1983). *El Origen de las Especies*. Madrid: SARPE.

Darwin, Ch., (1993). *Autobiografía*. Madrid: Alianza Editorial, S. A.

Dobzhansky, Th., (1980). Selección natural. En *Evolución*, Dobzhansky, Th., Ayala, F., Stebbins, G. L. y Valentine, J. W. Barcelona: Ediciones Omega, S. A.

Fernández – Rañada, A. (1990). *Movimiento caótico*. En *Orden y Caos*. Barcelona: Prensa Científica, S. A.

Glandorsff, P., and Prigogine, I., (1971). *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*. London: WILEY - INTERSCIENCE a division of John Wiley & Sons, Ltd.

Gleick, J., (1998). *Caos. La creación de una nueva ciencia*. Barcelona: Seix barral, S. A.

Gould, S. J., (1985). *El pulgar del panda*. Barcelona: Ediciones Orbis, S. A.

Gould, S. J., (1989). *Propuestas para una nueva teoría general de la evolución*. En *Revista El Paseante*, No. 13. Ramblas.

Gould S. J., (2002). *The structure of evolutionary theory*. Cambridge: THE BELKNAP PRESS OF HARVARD UNIVERSITY PRESS.

Kimura, M., (1987). *Teoría neutralista de la evolución molecular*. En *Genética Molecular*. Barcelona: Prensa Científica.

Kolmogorov, A. N., (1965). Three approaches to the quantitative definition of information. *Problemy Pederachi Informatsii*, 2 (1): 3-11.

Lewontin, R., (1979). La adaptación. En *Evolución, Libros de Investigación y Ciencia*. Barcelona: Editorial Labor, S. A.

Li, M., and Vitányi P., (1977). An introduction to Kolmogorov complexity and its applications. 2^a ed. New York: Springer-Verlag.

Mayer, E., (1979). La evolución. En *Evolución, Libros de Investigación y Ciencia*. Barcelona: Editorial Labor, S. A.

Maynard Smith, J., (1984). La teoría de la evolución. Madrid: Editorial Hermann Blume.

Monod, J., (1977). El azar y la necesidad. Novena Edición. Barcelona. Barral Editores.

Omodeo, P., (1968). Darwin. Los hombres de la historia. No. 13. Buenos Aires.

Prigogine, I., Nicolás G. and Babloyantz, A., (1972). Thermodynamics of evolution. *Physics Today*.

Sampedro, J., (2002). Deconstruyendo a Darwin. Barcelona: Editorial Crítica, S. L.

Sander, L., (1990). Crecimiento fractal. En *Orden y Caos*. Barcelona: Prensa Científica, S. A.

Solomonoff, R. J., (1964). A formal theory of inductive inference, part 1 and part 2. *Inform. Contr.*, 7: 1-22, 224-254.

Stebbins, J. W., (1980). La naturaleza de la evolución. En *Evolución, Dobzhasky, Th., Ayala, F., Stebbins, G. L. y Valentine, J. W.* Barcelona: Ediciones Omega, S. A.

Valentine, J. W., (1980). El registro geológico. En *Evolución, Dobzhasky, Th., Ayala, F., Stebbins, G. L. y Valentine, J. W.* Barcelona: Ediciones Omega, S. A.