
DARWIN 200 AÑOS Y EL ESTADO ACTUAL DE LA TEORÍA EVOLUTIVA¹

EUGENIO ANDRADE PÉREZ¹

¹Profesor titular, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional de Colombia. leandradep@unal.edu.co

No hay duda de que la teoría de Darwin, es la que mejor identifica al evolucionismo científico, y se ha convertido en el punto de referencia ineludible para deslindar los campos de las corrientes vitalistas por un lado, y las creacionistas por el otro. El vitalismo se refiere a explicaciones de la transformación de los seres vivos basadas en una sustancia con propiedades cuya naturaleza física no se logró precisar, como los “principios vitales” de Newton y los “fluidos caloríficos” de Lamarck. Por otra parte, el creacionismo se refiere a la acción directa de Dios en la producción de todas las especies en un pasado remoto en su forma actual, posición apoyada no solo por teólogos sino por los fundadores del pensamiento mecánico como Newton. El vitalismo cayó cuando la termodinámica demostró que el calor no existía como fluido sino que era una propiedad dependiente del movimiento atómico o molecular. Posteriormente el mecanicismo newtoniano superó su alianza original con el creacionismo, cuando gracias a Darwin, se comenzó a entender la producción de las formas de vida como un proceso gradual de transformación y diversificación a partir de ancestros comunes, mediado por la selección natural.

Para entender la teoría darwiniana, hay que examinar cómo se gestó, las evidencias empíricas existentes y el contexto social y cultural de su validación. Se trata de una evolución conceptual por etapas, con características específicas que delinearón sus postulados centrales. Se ha divulgado la idea de que Darwin resolvió en lo fundamental el problema de la evolución cuando planteó la fórmula condensada de “selección natural de variaciones aleatorias”, olvidando que este planteamiento se enmarca dentro de un esquema mucho más amplio que coexistió con otras hipótesis alternativas, como la lamarckiana que en determinados momentos tuvo más importancia y que hoy en día ha recobrado cierto interés.

Darwin fue un observador minucioso tal como se infiere de sus estudios y observaciones directas sobre las orquídeas, los cirrípedos o percebes y las lombrices de tierra, no fue un académico adocenado, ni un especialista en ninguna rama del saber, solicitó el apoyo de especialistas botánicos y zoólogos, cuando lo necesitó, avanzó sobre lo aportado por sus predecesores y abrió caminos, fue un amigo de la síntesis y del espíritu creador. Adoptó un punto de vista integral, que algunos científicos olvidan sometidos por las presiones institucionales a obtener resultados rápidos. Su condición social le permitió una existencia económicamente holgada que aprovechó para dedicarse al estudio y la investigación.

Su teoría reveló a la ciencia un tipo de objetividad de la cual muchos dudaban y que como decía William Whewell cuando dos o más observaciones independientes convergen en una misma hipótesis, debe ser porque indican o apuntan a una verdad. Supo integrar distintos tipos de evidencias (registros fósiles, diversidad y distribución geográfica de las especies, estudios embriológicos, cruce dirigido para obtención de razas animales, etc.) no solo para justificar el fenómeno de la evolución del cual E. G. Saint Hilaire y J. B. Lamarck habían proporcionado evidencias convincentes, sino sobre todo para proponer un mecanismo o explicación causal de la misma.

Lectura inicial presentada el 12 de marzo de 2009, en la inauguración de la Cátedra José Celestino Mutis: Darwin 200 años: evolución, diversificación y ramificación permanente.

He identificado cinco etapas que tipifican su desarrollo intelectual, aclarando que de la una a la otra hay transiciones graduales, y entre todas hay superposiciones, puesto que Darwin combinó hábilmente una diversidad de argumentos, al reconocer la gran complejidad del mundo viviente, manifestada en la dificultad de condensar la explicación en una fórmula definitiva (Andrade, 2009).

1. De 1831 a 1836, Darwin fue influenciado por la teología natural de William Paley y por la doctrina mecanicista recibida a través de la lectura de “Los principios de geología” de Charles Lyell. Esta etapa marcó el inicio de su trayectoria con el convencimiento de que los organismos están adaptados al medio ambiente, la existencia de leyes en la naturaleza y la posibilidad de aceptar transformaciones graduales, sin por eso atender contra el orden mecánico racional del universo. Es decir que debería ser posible explicar de acuerdo a ciertas causas inmediatas y en conformidad a leyes naturales el indiscutible fenómeno de la adaptación. Además, este período de su vida estuvo marcado por la huella imborrable que le produjo el contacto con la exuberancia y diversidad de especies en el trópico, que lo indujo a preguntarse si había uno o varios centros de creación o dispersión de las especies, inclinándose por la hipótesis monogenista (origen único) de clara raigambre judeo-cristiana.
2. De 1836-1854, recibió el influjo de la filosofía natural alemana a través de los embriólogos recapitulacionistas como Johan Friedrich Meckel, que veían en el desarrollo embriológico una repetición breve y comprimida de la larga serie de transformaciones por las cuales transcurrieron las formas ancestrales a lo largo de la evolución de las formas más simples y homogéneas a las más complejas y heterogéneas. Igualmente fue muy fuerte la influencia derivada del estudio de las leyes del desarrollo de Karl von Baer, según la cual el desarrollo embrionario transcurre de lo más general a lo más específico, planteamiento que lo indujo a concebir la evolución como un proceso de desarrollo dirigido hacia una mayor diferenciación o especificación por adición de etapas. De esta manera se acercó a la explicación de la unidad de tipo, proponiendo la existencia de ancestros comunes cuya forma podemos descubrir examinando las etapas tempranas de la embriogénesis. La ley de la semejanza embrionaria fue interpretada por Darwin como un argumento que explica la presencia de caracteres homólogos por la descendencia a partir de un ancestro común (Richards, 1998). En esta etapa a partir de la observación de un tipo inusual de cirrípedo que había descubierto en el sur de Chile, se impuso el reto de estudiar la taxonomía del grupo y durante un período de ocho años registró minuciosas y detalladas observaciones de todos los cirrípedos conocidos, tanto vivientes como fósiles, después de lo cual había llegado a odiar esas “pequeñas, complicadas y viscosas criaturas” (Richards, 1998). Pero no obstante el estudio le sirvió para confirmar su idea de que el desarrollo embrionario muestra la historia filogenética, proponiendo así su correcta ubicación taxonómica, derivada de la estructura de su forma larval homóloga a los crustáceos y no a los moluscos a los que se asemejan las formas adultas, derribando, así las tesis de Cuvier sobre la discontinuidad entre vertebrados, artrópodos, moluscos y radiolarios.
3. De 1854-1859, Darwin reconoció la importancia de los mecanismos lamarckianos de modificación como el hábito, el uso y desuso de los órganos, y la herencia de las características adquiridas como respuesta de los organismos a las condiciones de vida. La idea de selección natural que venía acariciando a partir de la primera lectura del “Ensayo de Población” de Thomas Malthus, todavía no jugaba un papel preponderante. En este período en carta a Hooker expresó acerca del concepto de especie, que los científicos tienen opiniones muy diversas, algunas basadas en la similitud, otras en la capacidad de dejar descendencia, otras en la esencia creada y otros criterios arbitrarios y risibles que provienen de insistir en definir lo indefinible. De ahí su adhesión a una ontología individualista y no esencialista,

dentro de la cual el principio de divergencia individual se convierte en el factor más importante de la evolución de las especies.

4. El período de 1859 a 1868 que caracteriza su madurez intelectual, transcurre entre las fechas de publicación de sus dos obras más ampliamente conocidas “El origen de las especies por selección natural o la preservación de las razas favorecidas en la lucha por la vida” y “El origen del hombre y selección en relación al sexo”, en las cuales a las teorías anteriores, añadió la idea de una evolución diversificadora a partir de ancestros comunes como resultado de la selección natural. A partir del reconocimiento de especies que permanecen idénticas en ambientes y climas muy diversos, Darwin propuso la existencia, también, de variaciones producidas independientemente de las condiciones de vida y de las necesidades del organismo, o azarosas en cuanto se ignoran las causas de cada variación particular. Estas variaciones mínimas entre individuos, constituyen la materia prima de la selección natural que retiene las más adaptadas y elimina las menos, en la lucha por recursos escasos. No se trata de un alejamiento por degeneración de una forma arquetípica ideal, ni de un necesario perfeccionamiento de acuerdo a un plan natural, sino de una selección por adaptación a condiciones locales muy específicas y contingentes del medio ambiente. El concepto de selección natural surgió por analogía a la selección artificial de razas por cruce dirigido, pero adquirió una mayor solidez al adoptar las tesis demográficas de Thomas R. Malthus sobre el crecimiento aritmético de los recursos y el crecimiento geométrico de la población, llegando a un punto de exceso poblacional en que la fuerza de la escasez o la selección natural, restablece el equilibrio entre población y recursos eliminando los menos aptos.
5. De 1868 a 1880, reconocemos a un Darwin que prefiguró el carácter discreto de los factores hereditarios y que denominó gémulas, dentro de un esquema conceptual que para él tenía un carácter provisional, en espera de mejores evidencias para justificar una hipótesis más sólida. Darwin intentó explicar en términos de la recién aceptada teoría celular cómo el medio ambiente podría influir o afectar el material hereditario. La hipótesis provisional de la pangénesis aunque iba en contravía del dogma central de la biología prefigurado por August Weismann, 1900, y posteriormente formulado por Watson y Crick, 1953, que prohíbe los flujos de información de las células somáticas a las germinales, del fenotipo al genotipo, o de las proteínas al ADN, nos muestra como el camino de la ciencia está sembrado de errores que no obstante contribuyen al desarrollo del conocimiento. La aproximación a la verdad no se da gratuitamente, sino que se trata de una eliminación no aleatoria de hipótesis posibles por efecto de la despiadada selección natural ejercida por la comunidad académica y científica que interpreta las evidencias empíricas de acuerdo con criterios y convenciones sociales culturalmente validadas. No obstante, hoy en día Eva Jablonka y Marion Lamb consideran que este problema puede entenderse recurriendo al fenómeno de la “asimilación genética” de Conrad Waddington y reconociendo la existencia de sistemas de herencia epigenética, diferentes a la información codificada en el ADN.

Las etapas 1 y 4 convergen en algunos de los puntos que han sido resaltados por la genética de poblaciones y el neodarwinismo a lo largo del siglo XX, mientras que la 2, 3 y 5, proponen una visión centrada en la embriogénesis y constituyen una aproximación que ha sido retomada en las dos últimas décadas por la Teoría de Sistemas en Desarrollo, formulada en la década del 90 por Susan Oyama, Paul Griffith, Russell Gray, Eva Jablonka, Mary Jane West-Eberhardt, entre otros. Estas etapas demarcan los énfasis, dado que Darwin nunca abandonó del todo los conceptos que caracterizan las etapas anteriores y en ocasiones mezclaba de una manera oportuna, pero siempre

muy profunda las distintas posiciones. Una nueva síntesis de la teoría evolutiva debería integrar todos estos enfoques.

La teoría de evolución por selección natural ha encontrado dos tipos de opositores, los creacionistas fundamentalistas de la derecha política estadounidense y los críticos de izquierda del sistema social imperante. A los primeros podría recordarles que de acuerdo a su autobiografía y cartas personales se puede afirmar que Darwin experimentó las mismas incertidumbres sobre lo divino que agobian a nuestra condición humana cuando nos enfrentamos ante el fenómeno de la fugacidad de la vida, no solo en la naturaleza, sino en el propio hogar, tal como lo experimento en carne propia a raíz de la desaparición súbita de su hija Anne Elizabeth, de 10 años en 1851. Este hecho determinó su alejamiento de la iglesia a la edad de 42 años, aunque mantuvo un tipo de teísmo filosófico sustentado en la convicción de la existencia de leyes naturales universales. Al respecto escribió en una carta a Julia Wedgwood:

Otra fuente de convicción en la existencia de Dios, conectada con la razón, y no con los sentimientos, me impresiona por poseer mucho peso. Se sigue de la dificultad extrema o más bien de la imposibilidad de concebir este universo inmenso y maravilloso, incluyendo al hombre con su capacidad para mirar hacia el pasado y hacia el futuro, como resultado de un azar ciego (o una necesidad). Cuando reflexiono así me siento compelido a buscar una Causa primera poseedora de una mente inteligente y en algún grado análoga a la del hombre; y entonces, merezco ser llamado Teísta (Darwin 1861, p. 312-313).

Además, a los creacionistas bíblicos les recordaría que Pierre Teilhard du Chardin, a quien neodarwinistas reconocidos como Teodosius Dobzhansky y Francisco Ayala tenían en gran aprecio, afirmó en 1955 que para el cristiano no existen razones de fondo para oponer evolución contra creación puesto que “la evolución no es sino la continuidad del acto creador”. De acuerdo a Stephen Jay Gould tampoco existen razones para oponer ciencia y religión puesto que se trata de magisterios independientes que no se superponen. El darwinismo (monogenista) hermana en una línea de continuidad genealógica todas las formas de vida que habitan la tierra. No sobra recordar aquí que los creacionistas (poligenistas) norteamericanos del fines del siglo XIX, rechazaban por absurda la teoría de la evolución que reconocía la existencia de un linaje compartido para los negros y los blancos, en contra de la idea de que los negros eran el producto de una creación anterior independiente. La evolución enseña que no existen razas biológicas claramente distinguibles en los seres humanos. El vínculo explicitado por Darwin que une entre sí a los distintos grupos humanos, y a los humanos con todas las especies, debería inspirar una ética solidaria con la vida en todas sus manifestaciones. No por azar Darwin comparte con Newton una tumba en la abadía de Westminster, puesto que ambos mostraron que hacemos parte de un mismo orden natural: el mundo físico regido por la ley universal de la gravitación y la naturaleza viviente gobernada por la ley de la selección natural.

A los críticos sociales del darwinismo (una diversidad de corrientes heterogéneas desde marxistas a ecologistas) habría que recordarles que el hecho de que Darwin haya mostrado un escenario de lucha y competencia en la naturaleza, no quiere decir que se esté presentando al capitalismo como un orden natural, ni que el darwinismo sea erróneo. Estos críticos parecen ignorar que el propio Darwin advirtió que:

el término de lucha y competencia se utiliza en sentido amplio y metafórico, incluyendo la dependencia de un ser con otro, y lo que es más importante no solo la vida individual, sino su éxito en dejar progenie (Darwin, 1859).

Los énfasis desmedidos en la supervivencia por competencia y no por estrategias mutua-

listas, constituyen una mala interpretación del darwinismo y no pueden tomarse como prueba de error en la teoría. El autoproclamado anarquista y biólogo ruso Piotr Kropotkin, 1989, [1902], había propuesto que la ayuda mutua es una ley de la vida animal al igual que la lucha, pero como factor de evolución es más importante, puesto que favorece el desarrollo de los hábitos y caracteres que garantizan el mantenimiento y el desarrollo posterior de las especies. La ayuda mutua conlleva la máxima cantidad de beneficio y disfrute de la vida individual, con el mínimo desperdicio de energía. La selección natural en pocas palabras favorece la simbiosis, la cooperación, el altruismo y la ayuda mutua, puesto que la supervivencia individual depende de la del grupo social.

La idea de una evolución abierta, ramificante e impredecible a partir de ancestros comunes que dejan descendencia con modificación no tiene discusión. A partir de Darwin ya no hay más progresiones ascendentes de tipo lamarckiano, derivadas de un plan de la naturaleza, sino un mundo complejo de relaciones e interacciones donde nosotros como grupo zoológico ocupamos con igual derecho que otras especies una rama en el frondoso árbol de la vida, inacabado, abierto a muchas posibilidades donde hay lugar tanto para la aparición de nuevas especies, como para otras extinciones.

Por otra parte, solamente mediante una discusión abierta y amplia, sin caer en una interpretación dogmática e ideologizada se puede avanzar en la construcción del conocimiento científico. El éxito incuestionable de la genética de poblaciones y el neodarwinismo a lo largo del siglo XX, hizo que lamentablemente los programas de educación en ciencias se limiten en la mayoría de los casos, cuando tratan el tema de la evolución, a una interpretación superficial del neodarwinismo, reduciendo a una teoría de genes lo que para Darwin giraba en torno a teorías embriológicas y organizmicas, a la vez que no tienen en cuenta el papel del hábito y rechazan de plano la investigación sobre las posibles influencias del medio ambiente en la variación evolutiva, impidiendo, de ésta manera, una visión contextualizada y crítica de la misma. La reducción genética de los procesos biológicos olvida que los genes actúan en redes controladas por los sistemas epigenéticos celulares influenciados por las condiciones del medio ambiente.

Una cosa es la realidad incontrovertible del hecho de la evolución, y otra muy diferente definir si las interpretaciones hegemónicas del darwinismo son las que mejor dan cuenta de este fenómeno. Cualquier crítica al cuerpo teórico del darwinismo, sustentada en nuevas evidencias y observaciones es bienvenida puesto que de esta manera se dinamiza el proceso de la ciencia. Pero hasta el presente todos los intentos de construir el darwinismo no han hecho más que afianzarlo. El pensamiento de Darwin parece tan plástico, como los sistemas con capacidad de evolucionar, que puede adaptarse a una diversidad de interpretaciones. Los siguientes descubrimientos: 1. La existencia de mutaciones bacterianas dirigidas a factores del medio. 2. La discontinuidad del registro fósil en el período denominado la gran explosión del cámbrico hace 570 millones de años en el que durante un lapso relativamente breve de aproximadamente 10 millones de años (el 0,2% de la historia de toda la vida en la tierra) aparecieron los planos corporales animales (artrópodos, moluscos, anélidos, cordados), es decir los primeros representantes de los grandes grupos (*phyla*) a los que pertenecen las especies actuales y otras ya extintas. 3. Patrones genéticos prácticamente constantes en todos los seres vivos y la presencia de los mismos complejos génicos Hox que definen los dominios corporales tanto de invertebrados como vertebrados, han estimulado la búsqueda de interpretaciones más amplias y profundas del fenómeno de la evolución.

La vigencia del darwinismo se refleja en que el esquema “variación, herencia y selección natural” ha sido susceptible de nuevas interpretaciones fundadas en las evidencias proporcionadas por las investigaciones sobre la estructura molecular de la materia viviente, la biología celular, la embriología, la etología, la psicología animal, la ecología, la biogeografía, la paleontología, la

taxonomía, la genómica comparada, etc. Además los aportes de la termodinámica de sistemas abiertos lejos del equilibrio y de la teoría de la información intentan explicar físicamente la autoorganización y la emergencia de sistemas capaces de evolucionar por selección natural. Los mayores interrogantes hoy en día tienen que ver con el cómo entender la emergencia de los niveles de organización o las grandes transiciones evolutivas, pero se considera que la inclusión del principio de auto-organización y el reconocimiento de la existencia de interacciones no aleatorias entre módulos estructurales semiautónomos y plásticos pueden aportar mucho en este sentido.

El pensamiento darwiniano es un sistema en desarrollo que se enriquece y madura, siendo objeto de varias interpretaciones, sin que todavía se hayan agotado todas sus posibilidades. El evolucionismo evoluciona y hoy en día somos testigos de varios intentos teóricos de mejorar su propuesta original. A propósito Margaleff, 1996, p. 122-123, sostiene que:

Fundamentalmente se trata de examinar si los procesos de decisión que definen quién sobrevivirá y quién va a morir son realmente uniformes. Existe la sospecha de que los propios organismos, en función de su grado de organización, pueden modificar, complicándolos en el curso de la evolución, procesos de decisión que antaño eran más simples. De esta manera habría una evolución de las formas de selección natural y, por tanto, una evolución de la evolución, lo cual es muy coherente con la sorprendente capacidad que muestra la información para replegarse o envolverse sobre sí misma.

Recordemos que el filósofo de la ciencia Charles S. Peirce había anticipado en 1891 que el darwinismo podía ser extendido y ampliado para constituirse en un esquema evolutivo aplicable a diversas disciplinas y no solo a la biología. En otras palabras, Peirce propuso que el evolucionismo o la idea de cambio a través del tiempo debería constituirse en el eje para elaborar una teoría unificada de la ciencia. La fecundidad del darwinismo, apenas prevista por el mismo Darwin, no solo permitió unificar la concepción del mundo biológico, sino que dió el esquema general para interpretar otros saberes afines como la antropología, la lingüística, la psicología, y otros aparentemente tan disímiles como la cosmología, la epistemología evolutiva, la inteligencia artificial, etc. En la última década se ha propuesto una perspectiva informática y semiótica que identifica el fenómeno de la comunicación por medio de signos, la interpretación de señales, el reconocimiento no aleatorio de patrones, y la elaboración de códigos, como el fundamento de las interacciones evolutivas.

Este concepto añade al esquema “variación, herencia y selección natural” dos nociones importantes “auto-organización” y “elección individual” (Andrade, 2009; Andrade, 2007). La primera desarrollada por Ilya Prigogine, 1977 y Stuart Kauffman, 1993, se refiere al fenómeno según el cual los sistemas naturales en condiciones de apertura a los flujos de energía y materiales se organizan espontáneamente; para el caso de la emergencia de la vida las moléculas se organizan en patrones permitidos por sus propiedades físicas y químicas de los constituyentes moleculares. La segunda noción fue originalmente propuesta por J.M. Baldwin en 1896 y se refiere a la libertad de optar entre más de una configuración estructural posible, de acuerdo con las condiciones o factores del medio. Es decir que la evolución no opera por pura “exploración aleatoria”, ni por “reacción dirigida al medio”, sino por el intento de sobrevivir en condiciones locales ajustando los parámetros metabólicos, fisiológicos, ontogenéticos y comportamentales en el contexto de una tendencia a formar hábitos que dan como resultado la acomodación fenotípica que se convierte en la condición para la selección y fijación de nuevas configuraciones genéticas. En otras palabras la “elección individual” entre configuraciones alternativas posibles, constituye un verdadero acto creativo que se presenta permanentemente en la evolución y es

responsable del carácter abierto e impredecible de la misma. Resumiendo la “elección individual” propone y la selección natural dispone.

La Universidad Nacional de Colombia apoyó un simposio internacional y una cátedra de sede durante el primer semestre de 2009, para debatir y proponer algunas tesis con el propósito de despertar la inquietud intelectual por el conocimiento, esperando que en un futuro no lejano, nuestros estudiantes y profesores contribuyan desde esta esquina del mundo al desarrollo de la teoría evolutiva. Reconocemos el legado innegable de Darwin, pero para profundizarlo y ampliarlo a regiones impredecibles como el curso mismo de la evolución. Lejos de convertir a Darwin en un mito, o una ideología, la distancia en el tiempo y el espacio cultural en que nació y se consolidó su teoría, nos permiten una reflexión crítica, madura, donde como comunidad hispanoamericana tenemos algo que aportar al desarrollo de la ciencia. Darwin abrió un camino, ahora trasegamos por él sin apegos dogmáticos, contribuyendo creativamente a la construcción incansante de conocimiento. Esa es la tarea con la que estamos comprometidos, que por demás, es la obligación que nos corresponde como Universidad.

BIBLIOGRAFÍA

ANDRADE E. La ontogenia del pensamiento evolutivo. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia; 2009.

ANDRADE E. A Semiotic Framework for Evolutionary and Developmental Biology. *BioSystems*. 2007;90:389-404.

BALDWIN JM. A New Factor in Evolution. *Am Nat*. 1896;30:441-451,536-553.

DARWIN C. [1859]. The origin of species by means of Natural Selection or the preservation of favoured races in the struggle for life. First edition, John Murray, London. Edition based on the text of first edition. London: ElecBook; 1997.

DARWIN C. Life and letters of Charles Darwin, including an autobiographical chapter. Vol 1. Edited by his son Francis. London John Murray, Abermale Street 1887. 1861; Chap. VIII, p. 313. <http://darwin-online.org.uk/>

DARWIN C. The Variation of Animals and Plants under Domestication. Second edition revised. Fourth Thousand in Two volumes. Vol II with illustrations. New York D. Appleton and Company. 549 and 551 Broadway 1876; 1894.

DARWIN C. The Descent of Man and Selection in Relation to Sex. London, Chicago and New York: Rand, McNally & Company, Publishers; 1874.

DARWIN C. [1859]. The origin of species by means of natural selection or preservation of favored races in the struggle for life. Nueva York: Collier Books; 1962.

JABLONKA E, LAMB MJ. Evolution in Four Dimensions. Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life. A Bradford Book. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press; 2006.

KAUFFMAN S. The Origins of Order Self-Organization and Selection in Evolution. New York: Oxford University Press; 1993.

KROPOTKIN, P. [1902]. Mutual Aid: a Factor of Evolution. Montreal: Black Rose Books; 1989.

MARGALEFF R. Variaciones sobre el tema de la selección natural. Exploración, selección y decisión en sistemas complejos de baja energía. En: Wagensberg J, editor. Proceso al azar. Metatemas 12. Barcelona, España: Tusquets Editores; 1996.

OYAMA S. The Ontogeny of Information. Developmental Systems and Evolution. Segunda edición. Durham: Duke University Press; 2000.

PEIRCE CS. La arquitectura de las teorías. *The Monist* I; Enero 1891:161-76.

RICHARDS R. El Significado de la Evolución. La construcción morfológica y la reconstrucción ideológica de la teoría de Darwin. Versión de Susana del Viso y Tomás R. Fernández Rodríguez, Ciencia y Tecnología. Madrid: Alianza Editorial; 1998.