

Jorge Granados Zúñiga

## La evolución de los sistemas bioquímicos complejos

---

**Resumen:** *La evolución de los sistemas bioquímicos complejos plantea un desafío científico y filosófico de gran importancia. La teoría darwiniana es una posible solución, pero, tomando en cuenta las dificultades y limitaciones que muestra, se justifica la pertinencia de plantear explicaciones modificadas, complementarias o alternativas.*

**Palabras clave:** *Teoría de la evolución. Darwinismo. Sistemas bioquímicos complejos.*

**Abstract:** *The evolution of complex biochemical systems raises a major scientific and philosophical challenge. Darwinian theory is a possible solution but, taking into account its difficulties and constraints, the relevance of modified, complementary or alternative explanations is justified.*

**Keywords:** *Theory of evolution. Darwinism. Complex biochemical systems.*

Con la aparición de los sistemas bioquímicos complejos se alcanza uno de los puntos culminantes en el desarrollo de la diversidad biológica sobre la tierra. Comprender cómo han evolucionado estos sistemas representa un importante desafío científico y filosófico. Si bien es cierto que la teoría darwinista, en general, y la de la selección natural, en particular, se han erigido como la explicación predominante de la evolución de la diversidad biológica, limitaciones o inconsistencias parecen demandar modificaciones o explicaciones alternativas. En este artículo, después de contextualizar brevemente el problema de la evolución de los sistemas bioquímicos

complejos, se hace un recuento general de la explicación darwinista y, finalmente, se presentan algunas sugerencias de explicaciones modificadas, complementarias o alternativas.

### 1. Los sistemas bioquímicos complejos como problema científico y filosófico

Dilucidar los mecanismos involucrados en la evolución de los sistemas bioquímicos complejos es un desafío central en las ciencias biológicas y en la filosofía; científico porque implica disponer de herramientas y metodologías de recopilación y análisis de la información biológica y paleobiológica, y filosófico por ocuparse de problemas epistemológicos fundamentales.

Ejemplos de los múltiples sistemas bioquímicos complejos que existen en la naturaleza son: la regulación de las vías metabólicas, los mecanismos de expresión genética asociados con las proteínas Rab o la regulación de la coagulación sanguínea. Los intentos para explicar la evolución de estos sistemas y otros similares pasan por el uso de varios recursos técnico-científicos y de conceptos epistemológicos como causalidad, mecanismo biológico, modelo explicativo y explicación teleológica.

#### 1.1. Los sistemas bioquímicos complejos

Un sistema bioquímico complejo está constituido por una red de elementos que interactúan entre sí y con otros sistemas en múltiples direcciones. Una descripción muy somera de algunos ejemplos como las vías metabólicas o las proteínas Rab permite comprender mejor la magnitud

de su complejidad. Las vías metabólicas constituyen una elaborada red de interrelaciones que regulan diversos procesos en los seres vivos y, usualmente, se asume que son el resultado de la selección natural (SN) actuando en el nivel molecular (Meléndez-Hevia, Montero-Gómez & Montero, 2008, 505). Sin embargo, puesto que la SN solo actúa en entidades que poseen información, metabolismo y membranas, surge la dificultad por explicar el origen de las tres características mencionadas bajo condiciones en las que esta no actuaría, tales como las que se estima que prevalecían cuando se originó la vida. Una vez constituidas las redes metabólicas, parece que se ha consolidado una evolución restringida de los genes que codifican para la mayoría de las reacciones bioquímicas en procariotas, por lo que dichas redes parecen estar altamente constreñidas por las combinaciones de reacciones favorecidas por la SN (Wagner, 2009, 12). La posibilidad de que existan mecanismos evolutivos diferentes entre procariotas y eucariotas obligaría a replantearse un modelo diferente del modelo del árbol de la vida, tan importante en las teorías evolutivas tradicionales (Baptiste & *al.*, 2009, 10-12). Así, la filogenia procariota podría evidenciar el aparente fallo para lograr una integración en el esquema del árbol de la vida, a pesar de que existen bases de datos integradas para una reconstrucción filogenética de todos los linajes biológicos (O'Malley, 2013, 555).

Otro ejemplo ilustrativo de sistema bioquímico complejo es el de las proteínas Rab: la familia más grande entre las enzimas hidrolíticas de guanosina trifosfato, con más de sesenta miembros en los humanos (Stenmark, 2012, 1). El estudio de la evolución de estas proteínas ha permitido sugerir un posible último ancestro común eucariota y, mediante análisis bioinformáticos, encontrar secuencias de Rab representativas de la mayoría de los filas de eucariotas. Al comparar el repertorio de Rab de diferentes especies, se nota que algunas de estas proteínas se perdieron selectivamente durante la evolución de varias especies, mientras que otras se expandieron y diversificaron. Esto abre la posibilidad de que ganancias, diversificaciones y pérdidas de Rabs pudieran ser las fuerzas que dirigieron la plasticidad de las organelas durante la evolución (*Idem*).

La diversificación de proteínas pudo ocurrir por medio de rondas de duplicación genética, como se postuló para otro sistema bioquímico complejo: las proteínas de coagulación sanguínea (Davidson, Tuddenham & Mcvey, 2003, 1490).

Expuesto lo anterior, surge la tarea de intentar describir el proceso mediante el cual se originaron durante el desarrollo de la vida los sistemas bioquímicos complejos. Para ello son fundamentales dos conceptos epistemológicos básicos, que deben entenderse desde una óptica evolutiva: la causalidad y el mecanismo.

## 1.2. El problema de la causalidad en biología

Cualquier explicación de la evolución de los sistemas bioquímicos complejos debería establecer una relación de causalidad entre el mecanismo propuesto y la aparición del fenómeno biológico. La causalidad debe incluir una explicación de los eventos pasados, una predicción de los futuros y una interpretación de los fenómenos teleológicos, si bien la teleología en biología no debería ser otra cosa que el determinismo fisicoquímico (Mayr, 1961, 1503). Cuando se trata de establecer una relación de causalidad entre la SN y el origen de los sistemas bioquímicos complejos hay que referirse a esas tres dimensiones de la explicación. Por lo que respecta a la de los eventos pasados, cabe señalar que grandes áreas del darwinismo no se pueden probar experimentalmente, ya que, precisamente, los eventos cruciales, o bien ocurrieron en el pasado o necesitan miles de años antes de alcanzar una conclusión (*Idem*). Además, las proyecciones biológicas (como las geológicas) hacia el pasado tienen una base precaria y un desvío en la cronología podría sacudir las bases en las que Darwin (al igual que Lyell) construyó sus teorías (Macbeth, 1971, 110). A esto debería sumarse el hecho de que aparentemente no se puede encontrar un registro fósil de una línea que muestre un alto grado de especialización, originando un nuevo tipo, y todos los nuevos tipos que son capaces de radiación adaptativa parecen haberse producido por líneas ancestrales relativamente no especializadas, por lo que la

evolución es vista como una serie de callejones sin salida (Huxley, 2010, 562, 571).

En relación con la predicción de los eventos futuros, si bien es cierto que algunos autores sostienen que una teoría puede predecir en la medida que explique (Bunge, 1978, 321), otros señalan que en ciencias biológicas no se puede hacer tal afirmación y que la SN, aunque sea capaz de describir, no puede predecir (Scriven, 1959, 477). Sin embargo, la impredecibilidad no significa ausencia de causa, de manera que, aunque la SN no permita efectuar predicciones, no significa que no se puedan determinar en ella relaciones causales (*Idem*). En la teoría darwinista una de las dificultades con la definición del concepto básico “el más apto” (*fittest*) (ver sección 2.1) radica en predecir cómo será un organismo “más apto”, si bien es cierto que esto no significa que la idea de la adaptación como factor de supervivencia pierda todo su poder explicativo. Incluso, en la teoría de la evolución de Darwin se plantean predicciones hipotéticas, aunque estas sin ningún valor predictivo, ya que dependen de que las condiciones mencionadas en las hipótesis sean predecibles o producibles experimentalmente. Tales “predicciones” no son fácilmente falsables por la observación, ya que solamente sostienen la probabilidad de un cierto desenlace (*Idem*).

El último aspecto para establecer la relación causal se relaciona con las explicaciones de carácter teleológico. La SN actúa en favor de producir códigos de información que garanticen una conducta que incremente la adaptación, esto es, un propósito mecanístico (Mayr, 1961, 1504). Es el fenómeno de la adaptación evolutiva controlada por la SN, para el que se prefiere usar el término ‘teleonómico’: no se trata de la teleología aristotélica, sino que designa la aparente falta de propósito de un organismo y sus características y posee una base fisicoquímica (*Idem*). Algunos matices a la teleología estrictamente aristotélica intentan validar el valor explicativo de este tipo de descripciones, sosteniendo la existencia de una teleología natural determinada, tal como en los procesos biológicos homeostáticos (Ayala, 2012, 43), o distinguiendo entre la teleología dirigida hacia el pasado y al futuro, con lo que se puede constituir en una forma justificada de

comprensión (Brown, 2011, 29). Al intentar sustentar el valor de las explicaciones teleológicas comparándolas con las mecanístico-causales, debería demostrarse que los mecanismos no son explicaciones completas y que las teleológicas son autónomas respecto de las causales-mecánicas, compatibles con la completud del mecanismo y no redundantes (Walsh, 2012, 174). En algunos casos, incluso, se requeriría una explicación doble: una por medio de los mecanismos que lo causan y otra por los propósitos que tales eventos buscan. Sin embargo, la pluralidad de explicaciones y el emergentismo (principios que apoyarían el valor de las teleológicas) son una violación del principio de exclusión explicativa (ningún evento puede tener más de una explicación completa e independiente).

La teoría denominada pluralidad de explicaciones sostiene que puede haber más de una para un fenómeno, mientras que la teoría llamada emergentismo sostiene que las propiedades de los sistemas complejos figuran en las explicaciones que son completas en sus propios términos, y totalmente autónomas de las que remiten a las partes de tal sistema. Walsh (2012, 177-180) propone una alternativa: las explicaciones “no autónomas, causales emergentes”, como los sistemas dirigidos hacia una meta (teleológicos). Ya que una explicación comprende dos partes: una relación robusta que apoye contrafácticamente la invariancia del fenómeno y una descripción elucidante de esa relación, es necesario demostrar que las explicaciones teleológicas presentan tal estructura. Así, siguiendo con la propuesta de Walsh, la relación entre la meta y los medios para su alcance posee la misma estructura invariable que la relación entre un mecanismo y su efecto, pero con un giro: la dirección de la dependencia contrafáctica está invertida, pues en un sistema mecanístico los efectos dependen contrafácticamente de las causas y en uno teleológico las causas dependen de las metas. Además, respecto del criterio de no autonomía debe demostrarse que las descripciones teleológicas (conducentes) no pueden reemplazarse, sin pérdida de comprensión, por descripciones causales-mecánicas (productivas). Y, según Walsh, eso se logra porque la descripción productiva dice cómo ocurrió el efecto (se produjo por la causa), mientras que

la descripción conducente dice por qué ocurrió la causa (porque condujo al efecto).

Por lo anterior, la relación causal entre SN y evolución de los sistemas bioquímicos complejos no queda claramente establecida, dado que ni la explicación de los eventos pasados ni la predicción de los futuros resultan evidentes.

### 1.3. Mecanismos biológicos

Dentro de la vertiente causal-mecanicista en ciencias el uso de modelos explicativos es de especial relevancia, por lo que es pertinente plantearse qué tipo de mecanismo es la SN, si lo fuera. En la corriente que la concibe como tal se señala que la explicación mecanística newtoniana proporciona una analogía útil a la teoría evolutiva siempre que se tenga un análogo apropiado respecto de la primera ley de Newton, el cual es lo que se denomina la ley evolutiva de fuerza cero, según la cual es el cambio y no la estasis es la condición basal de los sistemas evolutivos (Brandon, 2010, 703). Además, se ha comparado la SN con procesos concebidos como típicos mecanismos biológicos, como la síntesis de proteínas, y se concluyó que también la SN puede denominarse mecanismo y reputarse explicativa (Illari & Williamson, 2010, 290). Tal vez, la teoría de la SN sea más matemática y más dependiente del concepto de probabilidad que el modelo de síntesis de proteínas: la correlación entre poseer una característica y el éxito reproductivo, y la correlación entre un organismo que cuente con una característica y que su descendencia la tenga son ambas importantes. Así, un campo (SN) descansa fuertemente en descripciones matemáticas, el otro (el modelo de síntesis de proteínas) depende más de diagramas estructurales.

La caracterización de un fenómeno mediante un mecanismo es muy importante para su comprensión, pues los mecanismos lo son *para* un fenómeno y en ese sentido estos tienen funciones. La SN es un mecanismo *para* la adaptación y se ajusta al lenguaje de la individuación funcional de los mecanismos. Tanto el mecanismo de la síntesis proteica como el de la SN son individualizables funcionalmente,

con actividades características y si se sitúan en un contexto cuentan, también, con funciones dentro de un rol. Además, la SN también puede descomponerse mecanísticamente: un mecanismo es una estructura que realiza una función en virtud de sus partes, las operaciones componentes y su organización. Solo que en la SN la descomposición es de tipo funcional, el mecanismo se descompone en submecanismos (*Idem*).

## 2. La teoría de la selección natural como solución al problema de la evolución de los sistemas bioquímicos complejos

Discutida la magnitud del problema que representa la evolución de los sistemas bioquímicos complejos y habiendo planteado la posibilidad de que la SN sea un mecanismo con una parcial relación causal con la evolución de estos sistemas, cabe ahora preguntarse lo siguiente: ¿Es la teoría de la SN una solución satisfactoria a dicho problema? A pesar de que *El origen de las especies* (1859) se publicó hace más de ciento cincuenta años, aún hoy existen errores en la interpretación de esta obra, lo cual restringe, en ocasiones, la comprensión de sus alcances y limitaciones. Además, se han señalado limitaciones epistemológicas en la teoría de la SN como *corpus* explicativo.

### 2.1. Errores en la interpretación de la teoría de la selección natural

Las confusiones relacionadas con la teoría darwinista podrían relacionarse con dos hechos: incide en la religión y es una teoría simple, por lo que casi cualquier persona podría malinterpretarla (Hull, 2011, 2). Cualquiera que sea la razón, existen varios elementos particularmente problemáticos en el darwinismo: la definición de especie, la personificación de la SN o el significado de ‘el más apto’ y términos asociados.

Con respecto de la definición de especie algunos autores han preferido aceptar que, al igual que ‘organismo’, ‘especie’ no se puede definir (*Idem*). El análisis del problema filosófico

y biológico de su definición plantea dos aspectos básicos: el problema de la especie no es primariamente empírico, sino que muestra una tensión con cuestiones filosóficas que requiere, pero no está determinada por, evidencia empírica; y la solución está en adoptar la idea de Ludwig J. J. Wittgenstein de parecido de familia o conceptos de grupo y considerar las especies como un ejemplo de tales conceptos (Pigliucci, 2003b, 600).

Otra dificultad que surge con la teoría darwinista es la personificación, muy común en libros de texto de la SN (Padian, 2013, 4); en lugar de, más correctamente, caracterizarla como una descripción de un mecanismo para supervivencia diferencial de individuos en un linaje, más que en un sentido causal. La SN es la descripción de un proceso, no un actor, es un desenlace *post hoc* de la lucha por la existencia. La SN no es un proceso creativo (ver sección 3.2), pues en la lucha por la existencia algunos individuos son eliminados antes de poder reproducirse (*Idem*).

El uso de términos como ‘aptitud’ (*fitness*), ‘el más apto’ y similares es particularmente relevante, dado que ocupan un lugar central en la teoría darwinista. Mientras el significado de ‘*fitness*’ se entendió originalmente en términos ecológicos, tomó un giro estadístico en cuanto a éxito reproductivo a lo largo del siglo XX, pero debería recuperarse la visión ecológica para ser más inclusivos en el tipo de sistemas que se examinan (Bouchard, 2011, 110). ‘*Fitness*’ se entendería mejor ecológicamente en tres sentidos:

- (a) La habilidad para competir,
- (b) la habilidad para cooperar y
- (c) la habilidad para construir (Peacock, 2011, 103).

La interpretación estadística de ‘*fitness*’ también sostiene que la distribución de las características se relaciona con el cambio en la población, pero no con la causa (Walsh, 2010, 148), y algunos modelos plantean formulaciones matemáticas de la genética de poblaciones en relación con la SN y la necesidad de una revisión de largo alcance de algunas de las nociones aceptadas de relaciones causales en evolución (Matthen & Ariew, 2002, 79).

Una dificultad con el principio “la supervivencia del más apto” es que muchos organismos mueren por factores que no están relacionados con alguna característica que posean. El descubrimiento de Darwin fue que lo apto, frecuentemente, es la explicación de la supervivencia, aunque él sabía que no poseía suficiente evidencia para establecer una correlación entre esta y la posesión de una característica útil observable (Scriven, 1959, 478). Actualmente es necesario abandonar la creencia original de Darwin de que cada detalle de la estructura de una criatura viva posee una utilidad actual o ancestral; lo mejor que se puede hacer es referirse a una reproducción diferencial del más apto y a la “buena fortuna” (*Idem*).

## 2.2. Dificultades epistemológicas de la teoría de la selección natural

Entre las principales dificultades epistemológicas que se señalan a la teoría de la SN está su carácter tautológico y que plantea una defensa indirecta del fenómeno (Brady, 1982, 79; Popper, 1985, 227). Por lo tanto, también se objeta el decepcionante poder predicativo o explicativo de la teoría darwinista y la dificultad para contrastarla, razón por la que se entiende la adaptación tan solo como la primera teoría no teísta convincente, y al darwinismo no como científico sino como metafísica (Popper, 1985, 230).

Las razones por las que se objeta que la SN no juega un rol en la explicación de las adaptaciones son:

- (a) Es una fuerza negativa,
- (b) la noción inapropiada de realismo que asume y
- (c) la diferencia de niveles que ocupan el *explanandum* y el *explanans*.

Con respecto de su carácter negativo se señala que puede explicar por qué se eliminan individuos, pero no por qué los que sobreviven o su descendencia poseen los rasgos que tienen (Nanay, 2005, 1101). La posición alternativa es la visión creativa (ver sección 3.2), según la cual la SN es un mecanismo capaz de generar un alto

grado de improbabilidad (Razeto-Barry & Frick, 2011, 345). Se ha propuesto una aproximación probabilística a la causalidad y la explicación como un medio para afrontar estos problemas relacionados con la SN, pero atemperando el realismo de la fuerza de la selección y revisando la forma en que se piensa acerca de la causación probabilística (Waters, 1991, 553). Además, el *explanandum* y el *explanans* son fenómenos de diferente nivel: la SN es un fenómeno en el nivel de la población, la adaptación ocurre en el nivel del individuo; lo que implicaría que puede explicar por qué los individuos en una determinada población poseen cierto rasgo, pero no por qué un cierto individuo lo tiene (*Idem*).

No obstante lo anterior, el valor del darwinismo para la ciencia como programa de investigación metafísico es muy grande, especialmente si se admite que puede ser criticado y mejorado (Popper, 1985, 232), incluso si se señala que quizás el mayor honor que se le puede conferir a Darwin es continuar estando en desacuerdo con su trabajo (Delisle, 2011a, 1).

### 2.3 La noción “ley” en Darwin

Aunque Darwin pensaba que existen leyes biológicas distintivas y comprendió los roles biológicos de la variación al azar y de la SN, estos parecen socavar la posibilidad de tales leyes (Haufe, 2012, 270). A pesar de esto, las leyes juegan el mismo rol en la ciencia de Darwin que en la contemporánea y no parece existir conflicto entre, por una parte, la variación al azar y la SN y, por otra, la posibilidad de la existencia de leyes biológicas distintivas. Esto sería así porque las leyes, frecuentemente, aparecen en Darwin a modo de reglas puestas por el Creador, que son obedecidas por los fenómenos como una forma para preservar la influencia de Dios en el curso de los eventos, sin que cada microestado de estos se conciba como una influencia directa de un decreto divino (*Idem*). De ahí que el triunfo del darwinismo fue el de una forma cristiana de describir el mundo sobre las otras tradiciones disponibles para los científicos (Cannon, 1961, 109-110).

Aún salvando esta noción de ley en Darwin, prevalece la preocupación acerca de la habilidad

de tales leyes para predecir (ver la sección 1.2), pues autores clásicos como Francis Bacon consideran que la verdadera maravilla de las leyes es su capacidad para confirmarlas por medio de predicciones exitosas. Aunque la capacidad de predicción es discutible para la SN, se rescata el hecho de que, al mostrar que los fenómenos actuales (especialmente las dificultades de su teoría) son al menos posibles en un mundo gobernado por la SN, Darwin explota la capacidad de las leyes para aceptar condicionales subjuntivos y decir lo que pudo o podría haber ocurrido si determinadas condiciones fueran verdaderas (Haufe, 2012, 275).

En la noción darwinista de ley los eventos al azar son muy importantes, pues son los que producen las variaciones sobre las que actúa la SN. Así, las variaciones son accidentales o productos del azar con respecto de los usos que tendrán, pero son gobernadas por leyes, solo que estas operan independientemente de las que gobiernan el destino de las diferentes formas de un organismo. Darwin entendió la SN como una ley que relaciona probabilidades y frecuencias (*Idem*).

### 2.4. Dificultades con la evidencia empírica para la teoría darwinista

El ámbito de las pruebas empíricas como apoyo de la SN resulta de gran importancia al tratar de dimensionar el valor científico y filosófico de la teoría darwinista. La visión tradicional sostiene que la intención de Darwin fue plantear una analogía que implica la eficacia causal de la SN por similitud con la selección artificial. En este proceso es fundamental la capacidad de todos los organismos vivos para cambiar y acumular cambios en las generaciones sucesivas. Sin embargo, aun la selección artificial debe demostrar que es capaz de producir nuevas especies, lo cual es poco probable dado los efectos adversos de la selección artificial en la adaptación del organismo (Sullivan-Clarke, 2013, 745). Esto sugiere que Darwin al referirse a la selección artificial en realidad está utilizando una analogía negativa, que sería consistente con contemporáneos suyos, como Lyell, quienes sostuvieron la inmutabilidad de las especies (*Idem*).

Entre otros vacíos fundamentales que se señalan en la cadena de evidencia de Darwin está el desconocimiento del mecanismo de la herencia y que no se cite ningún ejemplo visible de la evolución ocurriendo en la naturaleza (Kettlewell, 2009, 12). Modernamente, la búsqueda de evidencia empírica en apoyo de la SN no ha permitido obtener resultados concluyentes que apoyen las predicciones asociadas con la radiación adaptativa. Por ejemplo, el estudio de la radiación adaptativa de un grupo de lagartijas americanas para constatar las predicciones asociadas con dicho fenómeno no permitió verificar tales suposiciones, lo que sugiere que la definición de radiación adaptativa no debería estar condicionada por la existencia de una explosión temprana de diversificación ni generalizarse a linajes en los que las especies y la diversidad ecológica han evolucionado a partir de un ancestro único (Pincheira-Donoso, Harvey & Ruta, 2015, 11). Además, los análisis evolutivos se complican cuando a los datos de las especies vivientes se agrega la información de los fósiles. Por ejemplo, al realizar un análisis de datos en taxa de perezosos vivientes, se encuentra que existe una potencial sobresimplificación o identificación errónea de los patrones de macroevolución, si no se incluyen los datos de perezosos extintos (Raj Pant, Goswami & Finarelli, 2014, 5-6).

Dadas estas dificultades empíricas, no es de extrañar que otros autores aborden los problemas de la adaptación biológica desde una perspectiva que asume de entrada el valor explicativo de la SN. Por ejemplo, el análisis de las secuencias parciales de la hemocianina de veintiocho especies de pulpos señala que la SN actuó primariamente en las propiedades de carga de los residuos de superficie de la hemocianina, permitiendo a los pulpos mantener un suministro de oxígeno en regiones que van desde los polos hasta el trópico (Oellermann, Strugnell, Lieb & Mark, 2015, 11). En la misma línea de la presunción de la existencia de la SN, se postula que en varias poblaciones de peces espinosos los cambios rápidos en su ADN regulador les permitió alterar sus genes para adaptarse rápidamente a ambientes cambiantes (Sanders, 2014, 2). Y, similarmente, a partir de una serie de experimentos controlados

por fase, se concluye que los relojes circadianos están óptimamente diseñados para un trabajo de relojería confiable a lo largo de la evolución (Hasegawa & Arita, 2014, 4).

Ahora bien, aunque la evidencia de Darwin, incluso la geográfica, fuera enteramente circunstancial, sus argumentos le permiten construir una teoría convincente sobre la especiación en la que la SN juega un papel clave (Denton, 1996, 46), pero, a la luz de objeciones como las planteadas en esta sección, parece demandar algún tipo de modificación, ampliación o alternativa.

### **3. Soluciones modificadas, complementarias o alternativas a la selección natural**

Las dificultades de la teoría de la SN comentadas en la sección anterior incluyen ciertas dificultades epistemológicas, una noción de ley circunscrita a la aceptación de condicionales subjuntivos y limitaciones en la evidencia empírica, todo lo cual sugiere la necesidad de plantear soluciones alternativas al problema relacionado con la evolución de los sistemas complejos. En este sentido, se puede entender la visión creativa de la selección natural, la biología integrativa, el uso de sistemas matemáticos, la inercia filogenética o las visiones alternativas sobre el origen de la complejidad biológica.

#### **3.1. Conceptos reinterpretados**

Las adecuaciones en la teoría darwinista original no se remontan solamente a la incorporación de los conocimientos en genética, embriología o biología molecular (ver la sección 3.3), sino que también obligan a la reinterpretación de algunos conceptos básicos. Uno de ellos es la inercia filogenética que se refiere a la persistencia a través de cientos de millones de años de estructuras básicas en grupos de organismos relacionados, pero ecológicamente diversos, fenómeno que no se explica por medio de la SN (Shanahan, 2011, 60). Se ha sugerido que es un error pensar en la inercia filogenética como explicación en competencia con la SN, pues se trataría, simplemente,

de una consecuencia de esta: es una limitación a la trayectoria evolutiva futura impuesta por la adaptación previa (*Idem*). Como complemento de este fenómeno, se puede pensar también en el papel del azar en la mutación y la evolución, dado que existen fenotipos en los que las mutaciones causan cambios no azarosos que facilitan la adaptación evolutiva; entonces, los seres vivos pueden traducir el cambio en el ADN en cambios fenotípicos no azarosos que facilitan la evolución darwinista (Wagner, 2012, 112-115).

Otro concepto que ha requerido reinterpretación es el de selección sexual. Se ha planteado que la principal ventaja de la reproducción sexual es la habilidad para contrarrestar no solo la extinción, sino la evolución; puesto que los sistemas vivos existen gracias a su habilidad para reproducirse con una alta fidelidad (Shcherbakov, 2010, 5). Una característica crucial de la reproducción sexual es la formación de genomas de organismos individuales por la toma al azar desde un *pool* de genes barajado continuamente en lugar de la replicación directa del genoma del ancestro. Una consecuencia claramente antievolutiva de la sexualidad es que los genotipos de los individuos con una competitividad aumentada no se transmiten a la siguiente generación. En su lugar, se aparean con individuos ordinarios y estos genomas se distribuyen y reorganizan en una nueva combinación de genes evitando que el ganador explote su éxito (*Idem*).

También, debe reinterpretarse la noción de que en la evolución todo es una cuestión de “presión” evolutiva, pues la mayoría de las características que surgen en la historia evolutiva no parecen haberlo hecho como consecuencia de una intensa presión (Padian, 2013, 10). Antes bien, ocurre un fenómeno denotado por el término ‘exaptación’, fenómeno identificado en 1982 como aquel en que una característica surge en un proceso relacionado con un fenómeno diferente del que le dio origen. Darwin usó el término ‘*fitness*’ para describir qué tan bien adaptado está un organismo a su ambiente (ver la sección 2.1), pero lo importante no es que los individuos mejor adaptados establezcan más descendencia, pues no siempre lo hacen, sino que tengan mayor probabilidad para sobrevivir

hasta una edad reproductiva y dejar descendencia; no se trataría de cuánta, sino de su capacidad de sobrevivencia (*Idem*).

### 3.2. Una visión creativa de la selección natural

Una visión no creativa de la SN también parece requerir un replanteamiento, ya que al preguntarse por qué existen sistemas complejos en lugar de simples, el enfoque se dirige a la complejidad más que a la adaptabilidad, lo que desvía la atención para comprender la visión creativa de la SN a la luz de la biología evolutiva contemporánea (Razeto-Barry, 2013, 313). La teoría de Darwin puede responder a por qué existen entidades adaptadas en vez de no adaptadas, pero para ello debe aceptarse que Darwin defendió un papel creativo de la SN en el origen de las características. Hay un continuo histórico en la tradición inglesa que intenta relacionar la explicación del diseño adaptativo natural con la existencia de un diseñador sobrenatural. En este conjunto de ideas es la adaptabilidad, no la complejidad, la que incrementa el éxito reproductivo. Esta visión es la que subyace, por ejemplo, en los análisis de la secuenciación de peces cíclidos africanos para intentar explicar los mecanismos genómicos complejos que originan la diversidad en estos organismos, así como los procesos moleculares de la evolución en los vertebrados (Brawand & *al.*, 2014, 1).

### 3.3. La biología integrativa

La biología integrativa se define como un abordaje multidisciplinario de las investigaciones biológicas y teniendo en cuenta que la biología, como el resto de la ciencia, se entiende mejor como una empresa pluralista, y que cualquier intento de forzarla en un todo monista dañará los progresos en los objetos de estudio (Pigliucci, 2003a, 298). Los evolucionistas buscan comprender cómo la SN originó organismos, sin importar lo intrincado de sus estructuras, y la visión contemporánea es que el estructuralismo (que se pregunta de qué está hecho) y el funcionalismo (que se pregunta para qué función está hecho) pueden

converger cuando se enfocan en unos pocos organismos modelo tales como la mosca *Drosophila melanogaster*, el gusano *Caenorhabditis elegans* o la planta *Arabidopsis thaliana* (*Idem*).

Esta búsqueda de integración inicia con la síntesis evolucionaria o neodarwinismo desarrollada por Haldane, Fisher y Huxley como una fusión del mendelismo y el darwinismo, y la unión de diferentes subdisciplinas biológicas, aunque también debe verse como un programa darwinista en el cual las biociencias sirven como una marca utópica para el progreso de la civilización (Esposito, 2011, 40). La teoría de Darwin se desarrolló en el contexto de las suposiciones de la dinámica newtoniana, y la síntesis evolucionaria moderna o neodarwinismo combinó exitosamente la SN con la genética mendeliana desarrollando la genética de poblaciones con unas suposiciones de fondo sobre la dinámica de sistemas boltzmanianos (Weber, 2011, 75). La tradición investigativa darwinista ha cambiado al incorporar información de áreas nuevas como la biología molecular, la paleontología, la biología del desarrollo y la ecología de sistemas, ampliando sus perspectivas (*Idem*). Sin embargo, también se ha objetado que la síntesis moderna adolece de la exclusión de la embriología y muchas otras disciplinas. Hasta el desarrollo reciente del evo-devo no se integró la biología funcional en la síntesis evolutiva (Morange, 2011, 69). Además, se señala que la síntesis moderna prestó un pobre servicio a la dimensión conceptual del fenómeno evolutivo, pues no pudo explicarlo por medio de su estrecho cuerpo teórico (Delisle, 2011b, 57). También se advirtió de que en la síntesis moderna de la teoría evolutiva se ignoró el papel de la ontogenia en los sistemas orgánicos complejos, además de que el intento de la teoría evolutiva para capturar el mundo biológico en una sola explicación causal unificada descansa en la reducción de las cuatro causas aristotélicas a una sola (Rieppel, 1990, 293). Finalmente, se ha señalado que el darwinismo explica más y resuelve mejor que el neodarwinismo las aparentes anomalías entre los sistemas vivientes y las leyes naturales más generales (Brooks, 2011, 82).

### 3.4. Sistemas matemáticos y similares

El uso de análisis matemáticos, estadísticos y herramientas bioinformáticas se ha constituido en una importante estrategia de investigación para los fenómenos evolutivos, dadas las dificultades empíricas inherentes a este tema de estudio (ver la sección 2.4). Los modelos matemáticos incrementaron su importancia en los estudios evolutivos y continúan haciéndolo (Chaitin, 2010, 18; Crow, 2009, 1). Por ejemplo, un análisis matemático de la evolución del metabolismo de los organismos terrestres ha permitido desarrollar una ecuación que modela el efecto de la restricción calórica sobre la prolongación de la longevidad, modela la inmortalidad de algunos tipos de células y apoya el argumento del origen de la vida en los respiraderos volcánicos submarinos y chimeneas negras (O'Kelly, 2009, 5).

Estudios sobre la compatibilidad entre el estadistalismo (caracterización estadística de la SN, derivada de la genética de poblaciones) y las explicaciones causales de la SN basadas en contrafácticos han llevado a distinguir dos enunciados distintos del estadistalismo:

- (a) La imposibilidad de que la SN sea la causa que actúa en las poblaciones
- (b) y la conceptualización de que todas las causas evolutivas ocurren individualmente en el nivel de los organismos (Huneman, 2013, 606).

Lo segundo requeriría más argumentos metafísicos que serían problemáticos y tal posición metafísica sería incongruente con el uso científico y ordinario de 'causalidad' y 'explicación' (*Idem*).

Por lo que respecta a las herramientas bioinformáticas, se describió un método para ajustar los datos biológicos prestando atención a la reconstrucción del estado ancestral y al desempeño del modelo en comparación con una selección de métodos comparativos existentes tanto usando datos simulados como una base de datos de masa corporal de especies de mamíferos (Elliot & Mooers, 2014, 12). El modelo se ajusta al proceso estocástico con una tasa volátil de

cambio en que los caracteres biológicos sufren una mezcla de deriva neutra y eventos evolutivos ocasionales de gran magnitud. También se señaló que una herramienta principal en la biología de sistemas son los abordajes multiescalares para integrar submodelos de varios niveles de organización biológica en un modelo único (Klimenko, Matushkin, Kolchanov & Lashin, 2015, 1). En este caso, se construyó y simuló un conjunto de modelos multiescalares de comunidades microbianas distribuidas espacialmente, y se estudió la influencia de factores ambientales distribuidos no uniformemente sobre la diversidad genética y la evolución de los miembros de la comunidad. El manejo de las bases de datos para reconstrucciones filogenéticas también se ha constituido en un recurso de gran relevancia, pese a conflictos por hibridización, alineamiento incompleto de linajes o transferencia horizontal de genes que se introducen en ocasiones (Smith, Moore, Brown & Yang, 2015, 2).

### 3.5. Visiones alternativas

Darwin, en el *Origen de las especies*, consideró como absurda la idea de la evolución de estructuras o sistemas complejos a partir de precursores simples (Zimmer, 2013, 2). Esto, aunado a las limitaciones y dificultades señaladas en la sección 2, obliga a considerar la posibilidad de explicaciones alternativas a la SN para entender el surgimiento de los sistemas bioquímicos complejos.

En la década de los noventa del siglo pasado, se propusieron versiones modernas poderosas y provocativas, aunque imperfectas, que estudian la generación del orden biológico a partir de reglas estructurales y no por SN (Kauffman, 1993, 285 y ss.).

Se ha sugerido que la complejidad puede surgir por otras rutas: la vida tiene una tendencia propia de convertirse en más compleja con el tiempo, o bien, al surgir mutaciones al azar, emerge como un efecto colateral aún sin SN. La complejidad no sería puramente el resultado de millones de años de delicado afinamiento por parte de la SN, el “relojero ciego” de Richard Dawkins, sino que simplemente ocurriría. Una

alternativa a la teoría evolutiva estándar es que la complejidad se incrementa incluso en ausencia de la selección natural. Esta es una ley fundamental en biología: la ley evolutiva de fuerza cero. Además, observaciones con líneas de moscas de laboratorio parecen corroborar la predicción de la ley de fuerza cero: moscas de laboratorio debieron estar menos sujetas a la eliminación de mutaciones desventajosas y, entonces, convertirse en más complejas que las silvestres (Zimmer, 2013, 3-4).

## 4. Conclusión

La evolución de los sistemas bioquímicos complejos no se puede explicar, satisfactoriamente, únicamente a partir de la teoría de la selección natural de Darwin. Las modificaciones a esta teoría, las teorías complementarias o alternativas son necesarias a la luz de información empírica y planteamientos epistemológicos. El cambio de paradigma posiblemente sea factible en un futuro próximo a partir, de acuerdo con T. S. Kuhn, del desarrollo de una alternativa adecuada. Hoy como en el futuro, posiblemente el darwinismo predominará en las ciencias biológicas, aunque prevalece el hecho de que las condiciones que el modelo de Darwin requiere no han logrado demostrarse (Denton, 1996, 357), ni se han establecido claramente las relaciones de causalidad necesarias; prevalecen los errores de interpretación, dificultades epistemológicas, limitaciones de la noción de ley o dificultades con la evidencia empírica. Tal vez, se deba admitir humildemente que en un análisis final aún se sabe muy poco acerca de cómo ha surgido y se ha diversificado la vida sobre el planeta.

## Referencias

- Ayala, F. (2012). Evolution and Design: Teleological Explanations in Biology. *Revista Portuguesa de Filosofia*, 68(1/2), 33-49.
- Bapteste, E., O'Malley, M. A., Beiko, R. G., Ereshefsky, M., Gogarten, J. P., Franklin-Hall, L., ..., Martin, W. (2009). Prokaryotic evolution and the tree of

- life are two different things. *Biology direct*, 4, 34. <http://doi.org/10.1186/1745-6150-4-34>
- Bouchard, F. (2011). Darwinism without populations: A more inclusive understanding of the “Survival of the Fittest”. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(1), 106-114. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.002>
- Brady, R. H. (1982). Dogma and doubt. *Biological Journal of the Linnean Society*, 17, 79-96.
- Brandon, R. N. (2010). A Non-Newtonian Newtonian Model of Evolution: The ZFEL View. *Philosophy of Science*, 77(5), 702-715.
- Brawand, D., Wagner, C. E., Li, Y. I., Malinsky, M., Keller, I., Fan, S., ..., Di Palma, F. (2014). The genomic substrate for adaptive radiation in African cichlid fish. *Nature*, 9-10. <http://doi.org/10.1038/nature13726>
- Brooks, D. R. (2011). The Mastodon in the room: How Darwinian is neo-Darwinism? *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(1), 82-88. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.003>
- Brown, B. (2011). Ethics in Darwin’s melancholy vision. *Studies in history and philosophy of biological and biomedical sciences*, 42(1), 20-9. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.004>
- Bunge, M. (1978). *Causalidad*. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- Cannon, W. F. (1961). The Bases of Darwin’s Achievement: A Reevaluation. *Victorian Studies*, 5(2), 109-134.
- Chaitin, G. (2010). *To a Mathematical Theory of Evolution and Biological Creativity* (No. September) (1-23). New York: Centre for Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science.
- Crow, J. F. (2009). Mayr, mathematics and the study of evolution. *Journal of biology*, 8(2), 13. <http://doi.org/10.1186/jbiol117>
- Davidson, C. J., Tuddenham, E. G. & Mcvey, J. H. (2003). 450 million years of hemostasis. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, 1, 1487-1494.
- Delisle, R. G. (2011a). Foreword: Celebrating Charles Darwin in disagreement. *Studies in history and philosophy of biological and biomedical sciences*, 42(1), 1. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.015>
- \_\_\_\_\_. (2011b). What was really synthesized during the evolutionary synthesis? A historiographic proposal. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(1), 50-59. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.005>
- Denton, M. (1996). *Evolution: A Theory in Crisis*. Maryland: Adler & Adler.
- Elliot, M. & Mooers, A. (2014). Inferring ancestral states without assuming neutrality or gradualism using a stable model of continuous character evolution. *BMC Evolutionary Biology*, 14(1), 1-39. <http://doi.org/10.1186/s12862-014-0226-8>
- Esposito, M. (2011). Utopianism in the British evolutionary synthesis. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(1), 40-49. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.007>
- Hasegawa, Y. & Arita, M. (2014). Optimal Implementations for Reliable Circadian Clocks. *Physical Review Letters*, 113(10), 108101. <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.108101>
- Haufe, C. (2012). Darwin’s laws. *Studies in history and philosophy of biological and biomedical sciences*, 43(1), 269-80. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2011.10.011>
- Hull, D. L. (2011). Defining Darwinism. *Studies in history and philosophy of biological and biomedical sciences*, 42(1), 2-4. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.009>
- Huneman, P. (2013). Assessing statistical views of natural selection : Room for non-local causation ? *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 604-612.
- Huxley, J. (2010). *Evolution. The Modern Synthesis*. Cambridge (Massachusetts): The M.I.T. Press.
- Illari, P. M. & Williamson, J. (2010). Function and organization: comparing the mechanisms of protein synthesis and natural selection. *Studies in history and philosophy of biological and biomedical sciences*, 41(3), 279-91. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.07.001>
- Kauffman, S. (1993). *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press.
- Kettlewell, H. B. D. (2009). Darwin’s Missing Evidence: Changes in Moths Observed. *Scientific American*, 300(3), 12.
- Klimenko, A., Matushkin, G., Kolchanov, N. & Lashin, S. (2015). Modeling evolution of spatially distributed bacterial communities: a simulation with the haploid evolutionary constructor –1471-2148-15-S1-S3.pdf. *BMC evolutionary biology*, 15(Suppl. 1), S3.
- Macbeth, N. (1971). *Darwin Retried: an appeal to reason*. Massachusetts: Gambit.

- Matthen, M. & Ariew, A. (2002). Two Ways of Thinking about Fitness and Natural Selection. *The Journal of Philosophy*, 99(2), 55-83.
- Mayr, E. (1961). Cause and Effect in Biology. *Science*, 134, 1501-1506.
- Meléndez-Hevia, E., Montero-Gómez, N. & Montero, F. (2008). From prebiotic chemistry to cellular metabolism –The chemical evolution of metabolism before Darwinian natural selection. *Journal of Theoretical Biology*, 252(3), 505-519. <http://doi.org/10.1016/j.jtbi.2007.11.012>
- Morange, M. (2011). What will result from the interaction between functional and evolutionary biology? *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(1), 69-74. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.010>
- Nanay, B. (2005). Can Cumulative Selection Explain Adaptation? *Philosophy of Science*, 72(5), 1099-1112.
- Oellermann, M., Strugnell, J. M., Lieb, B. & Mark, F. C. (2015). Positive selection in octopus haemocyanin indicates functional links to temperature adaptation. *BMC Evolutionary Biology*, 15(1), 133. <http://doi.org/10.1186/s12862-015-0411-4>
- O’Kelly, G. C. (2009). The terrestrial evolution of metabolism and life –by the numbers. *Theoretical Biology and Medical Modelling*, 6, 17. <http://doi.org/10.1186/1742-4682-6-17>
- O’Malley, M. (2013). When integration fails: Prokaryote phylogeny and the tree of life. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 551-562.
- Padian, K. (2013). Correcting some common misrepresentations of evolution in textbooks and the media. *Evolution: Education and Outreach*, 6(1), 11.
- Peacock, K. A. (2011). The three faces of ecological fitness. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(1), 99-105. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.011>
- Pigliucci, M. (2003a). From molecules to phenotypes? The promise and limits of integrative biology. *Basic and Applied Ecology*, 4(4), 297-306.
- . (2003b). Species as family resemblance concepts: the (dis-)solution of the species problem? *BioEssays: news and reviews in molecular, cellular and developmental biology*, 25(6), 596-602. <http://doi.org/10.1002/bies.10284>
- Pincheira-Donoso, D., Harvey, L. P. & Ruta, M. (2015). What defines an adaptive radiation? Macroevo­lutionary diversification dynamics of an exceptionally species-rich continental lizard radiation. *BMC Evolutionary Biology*, 15(1), 153. <http://doi.org/10.1186/s12862-015-0435-9>
- Popper, K. R. (1985). El darwinismo como programa metafísico de investigación. En *Búsqueda sin término. Una autobiografía intelectual*. Madrid: Editorial Tecnos, S. A., colección “Filosofía y Ensayo”.
- Raj Pant, S., Goswami, A. & Finarelli, J. A. (2014). Complex body size trends in the evolution of sloths (Xenarthra: Pilosa). *BMC evolutionary biology*, 14(1), 184. <http://doi.org/10.1186/s12862-014-0184-1>
- Razeto-Barry, P. (2013). Complexity, adaptive complexity and the Creative View of natural selection. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(3), 312-315.
- Razeto-Barry, P. & Frick, R. (2011). Probabilistic causation and the explanatory role of natural selection. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(3), 344-355. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2011.03.001>
- Rieppel, O. (1990). Structuralism Functionalism, and the Four Aristotelian Causes. *Journal of the History of Biology*, 23(2), 291-320.
- Sanders, R. (2014). Counting fish teeth reveals regulatory DNA changes behind rapid evolution, adaptation. *Phys. Org.*, (September), 4-7.
- Scriven, M. (1959). Explanation and Prediction in Evolutionary Theory. *Science*, 130(3374), 477-482.
- Shanahan, T. (2011). Phylogenetic inertia and Darwin’s higher law. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(1), 60-68. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.013>
- Shcherbakov, V. P. (2010). Biological species is the only possible form of existence for higher organisms: the evolutionary meaning of sexual reproduction. *Biology direct*, 5, 14.
- Smith, S. A., Moore, M. J., Brown, J. W. & Yang, Y. (2015). Analysis of phylogenomic datasets reveals conflict, concordance, and gene duplications with examples from animals and plants. *BMC Evolutionary Biology*, 15(1), 150. <http://doi.org/10.1186/s12862-015-0423-0>

- Stenmark, H. (2012). The Rabs: A family at the root of metazoan evolution. *BMC Biology*, 10(1), 68.
- Sullivan-Clarke, A. (2013). On the causal efficacy of natural selection: A response to Richards' critique of the standard interpretation. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(4), 745-755.
- Wagner, A. (2009). Evolutionary constraints permeate large metabolic networks. *BMC Evolutionary Biology*, 9(1), 1-17. <http://doi.org/10.1186/1471-2148-9-231>
- . (2012). The Role of Randomness in Darwinian Evolution. *Philosophy of Science*, 79(1), 95-119.
- Walsh, D. (2012). Mechanism and purpose: A case for natural teleology. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 43(1), 173-181. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2011.05.016>
- . (2010). Not a Sure Thing: Fitness, Probability, and Causation. *Philosophy of Science*, 77(2), 147-171.
- Waters, C. K. (1991). Tempered Realism about the Force of Selection. *Philosophy of Science*, 58(4), 553-573.
- Weber, B. H. (2011). Extending and expanding the Darwinian synthesis: The role of complex systems dynamics. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 42(1), 75-81. <http://doi.org/10.1016/j.shpsc.2010.11.014>
- Zimmer, C. (2013). The Surprising Origins of Evolutionary Complexity. *Scientific American*, 1-7.

**Jorge Granados Zúñiga** ([jorge.granados@ucr.ac.cr](mailto:jorge.granados@ucr.ac.cr)). Docente e investigador de la Universidad de Costa Rica. Catedrático del Departamento de Bioquímica de la Escuela de Medicina (Universidad de Costa Rica) y del Postgrado en Ciencias Biomédicas (Universidad de Costa Rica). Apartado postal 1010-11502, Costa Rica.

Recibido: el miércoles 20 de julio de 2016.  
Aprobado: el jueves 11 de agosto de 2016.