

teorema

Vol. XXXIV/1, 2015, pp. 75-94

ISSN: 0210-1602

[BIBLID 0210-1602 (2015) 34:1; pp. 75-94]

Un cuarto de siglo de vida artificial: balance y perspectivas

Alvaro Moreno

RESUMEN

La Vida Artificial (VA) es hoy, de la mano de la Biología Sintética (BS), un programa de investigación en pleno auge. Pero comparado con su antecesora, la VA de inspiración computacional, es dudosamente “artificial”, mientras que la VA, siendo claramente artificial, es dudosamente “vida”. Se analiza en el artículo la tensión entre estos dos elementos y su relación con las causas del éxito de la BS en detrimento de su antecesora, la VA. Por último, se analizan las posibles implicaciones prácticas del desarrollo de la BS, argumentándose que ésta puede generar una profunda transformación del status de nuestra especie en la Biosfera.

PALABRAS CLAVE: *vida artificial, biología sintética, formalismo, autonomía, sostenibilidad ecológica.*

ABSTRACT

Today, thanks to Synthetic Biology (SB), artificial life is a successful research programme. However, the products of SB are only arguably “artificial”, while the products of its predecessor, computational Artificial Life (AL), though clearly artificial, are only arguably “living” systems. The article discusses the tension between these two elements and how the different relations between them can explain SB’s success at the expense of its predecessor AL. Finally, through an analysis of the possible practical implications of SB’s development, it is argued that SB may create a radical transformation of the status of our species in the Biosphere.

KEYWORDS: *Artificial Life, Synthetic Biology, Formalism, Autonomy, Ecological Sustainability.*

INTRODUCCIÓN

El objetivo de la fabricación de la vida es una vieja idea, pero hoy este objetivo se ha convertido en un proyecto científico serio. En

principio, la idea de “Vida Artificial” (VA en español, AL en inglés) parece sencilla: es el intento de fabricar vida, y de hacerlo científicamente. Sin embargo, desde su nacimiento oficial, a finales de los 80¹, hasta la fecha, lo que se ha entendido por vida artificial es un conjunto extremadamente variado –e incluso, contradictorio– de cosas. Y es que ya en el propio uso del término tenemos un problema, pues la denominación “Vida Artificial” se suele identificar con la disciplina creada en 1987 por Christopher Langton (1989a), (1989b), (1992), (1998), algo muy distinto de la cada vez más pujante disciplina denominada Biología Sintética (BS), que también se ubica en el proyecto de crear artificialmente vida.

Ambas disciplinas buscan mostrar cómo lo vivo puede producirse a partir de procesos básicos (síntesis) inducidos artificialmente. Así, la síntesis y no sólo el análisis se convierte en una forma de conocimiento de lo vivo. Los propios programas de investigación de la VA y la BS son un ejemplo de esta imbricación entre el objetivo de comprender y el de manipular. Ambas disciplinas pretenden descubrir principios universales de la vida (en palabras de Langton, comprender la vida como debe ser en lugar de simplemente como la conocemos en nuestro planeta) y este objetivo sólo puede llevarse a cabo por medio de la acción técnica de fabricar vida (ya se entienda *in vitro*, como sistemas químicos, *in silico*, como sistemas computacionales, o robótica, como artefactos materiales hechos con materiales no biológicos).

Sin embargo, como ya hemos señalado, no hay mucho más en común detrás de esta idea genérica de entender la vida fabricándola. De hecho, es difícil imaginar una disparidad más grande que la representada entre la línea de investigación de la VA y la de la BS. Mientras que la primera nació sobre todo en el marco de las llamadas “ciencias de lo artificial” [Simon (1969), Casti (1997)], la segunda en cambio ha surgido casi como una evolución natural de la biología, o mejor dicho, de la imbricación entre ésta y las biotecnologías.

El surgimiento de la VA se articuló sobre *una idea formal de lo vivo*. Para Langton –que por cierto, venía del mundo computacional– la vida se definía por su organización, no por su materialidad. Langton hablaba del “chovinismo del carbono”, argumentando que los biólogos estaban limitados por el hecho de que la única vida conocida está basada en la química, y además, en una forma muy concreta de química, la del carbono. La VA propugnaba que para estudiar la “vida tal y como puede ser” y no simplemente, como la conocemos [Langton

(1989a)], lo que hace falta es ignorar la materialidad específica y tratar de reproducir, en cualquier otro medio material (otras químicas, otros materiales físicos, o incluso, en los patrones de electrones en el ordenador) la organización característica de lo vivo. Y ésta se caracteriza por exhibir determinadas propiedades, como la auto-reproducción, la capacidad evolutiva, la capacidad adaptativa, etc., pero no por la materialidad concreta en la que éstas se realizan. Desde estas premisas, los investigadores de la VA se lanzaron a desarrollar sobre todo programas de ordenador que intentaban reproducir este tipo de propiedades, con el requisito de que el diseño de estos programas no incluyera instrucciones explícitas para generar las mencionadas propiedades. Es decir, que los sistemas de VA hagan cosas de forma emergente, sin estar explícitamente programados para ello². Sin embargo, este programa de investigación fue mucho más popular entre programadores (y diseñadores de robots) que entre biólogos, algunos de los cuales [Maynard Smith, citado en Horgan (1995)] reprocharon a la VA ser una “ciencia sin hechos”, pues sus trabajos no son simulaciones o modelos de sistemas empíricos, sino sistemas computacionales (o robóticos) que se construyen *sin ningún referente empírico*³.

En cambio, la Biología Sintética (BS) se ha desarrollado como una “ingenierización” de la biología tradicional. En realidad, la BS es una profundización y ampliación de la Ingeniería Genética, surgida en los sesenta. La diferencia con la Ingeniería Genética es que la BS trata no ya de modificar organismos, sino de *crear nuevas formas de vida* a partir del re-diseño de los organismos naturales [Benner & Sismour (2006), Andrianantoandro et al. (2005), Serrano (2007), Peretó & Catalá (2007), AAVV (2014)].

Desde que empezaron a desarrollarse las nuevas tecnologías de la Biología Molecular en los 80 (sobre todo el PCR⁴ para reproducir secuencias de ADN) la investigación se ha hecho indisociable de la manipulación sobre los procesos biológicos de desarrollo y reproducción. Lo que diferencia a las intervenciones en la biología actual de la tradicional es la capacidad de alterar los procesos, modificando la estructura íntima –fundamental– de la vida. La acción a nivel molecular sobre los genes confiere un enorme poder para transformar deliberadamente la organización de los sistemas biológicos. Cuanto más avanzamos en los conocimientos de la organización molecular de los sistemas vivos, más aumentamos nuestro poder de instrumentalizar a dichos sistemas. Pero también, cuanto más avanzamos en nuestros conocimientos, más

depende la investigación teórica de la manipulación sobre los objetos de estudio. Y la BS en cierto sentido no es sino una profundización de esa línea de investigación, en la que cada vez se confunde más la labor del investigador con la del ingeniero.

El principio básico de la BS es que los organismos son tratados como un conjunto de bloques de construcción, y los genes son simples piezas del conjunto. La perspectiva es esencialmente ingenieril: al igual que en la construcción de un coche o un avión, las diferentes piezas (“biobriks”) pueden ser diseñadas y ensambladas de cualquier forma que se desee [Endy (2005)]. En este aspecto, la BS se diferencia también de la VA, pues ésta es más sistémica y holística, mientras que la BS es más modular [Etxeberria (2008)]. En la BS los científicos inventan nuevos genes, seleccionan sus características, los sintetizan en el laboratorio y luego los insertan en un organismo. Esto es posible porque la información genética en esencia se reduce a combinaciones de cuatro moléculas básicas –adenina, citosina, guanina y timina– las cuales pueden ser fabricadas sintéticamente. Por tanto, para re-diseñar un organismo el camino es manipular los patrones de estas cuatro moléculas, y así generar genes sintéticos, que tienen, una vez expresados (es decir, insertados en una bacteria en sustitución de los suyos originales), las funciones para las que han sido diseñados. El organismo va a hacer exactamente lo que pretende el científico. En última instancia, se trata de tomar el control de la vida natural, rediseñándola y reconstruyéndola para realizar nuestros propios fines.

Pero, como dice E. Fox Keller (2009), en esta actividad de intentar “reconstruir” desde piezas o módulos básicos procesos integrales, se expresa también un saber, pues es a través de esas manipulaciones como realmente aprehendemos la lógica de la vida. Lo que encontramos, en definitiva, como elemento común entre la VA y la BS es la idea, formulada por R. Rosen (1991), de que para comprender la vida hay que *fabricarla*.

I. LO ARTIFICIAL Y LO VIVO

Vistas las cosas con la perspectiva de un cuarto de siglo, podríamos decir que estamos muy lejos de alcanzar el objetivo de generar vida artificial. Pues cuando los sistemas generados son inequívocamente artificiales (robots, sistemas computacionales, sistemas bioquí-

nicos sintetizados a partir de componentes no vivientes) el resultado no puede razonablemente calificarse, ni de lejos, como “viviente”. Y cuando, por el contrario, los sistemas generados son inequívocamente vivos (células manipuladas con materiales sintéticos), lo artificial en ellos es apenas una pequeñísima parte del conjunto de su organización. En la VA está muy claro que los sistemas son plenamente artificiales, pero es muy dudoso que se puedan considerar como vivos; en la BS, en cambio, la mayoría de sus logros (sobre todo, los más publicitados⁵) son evidentemente sistemas vivos; el problema es que solo son artificiales en un grado muy pequeño si consideramos el conjunto de la organización del sistema⁶.

En realidad, entre los propios investigadores hay también muy diferentes ideas tanto de lo que se debe entender por “vida” como por “artificial”. En lo de “artificial” hay toda una panoplia de casos. Plenamente artificiales son desde luego los robots y los sistemas computacionales “lifelike”⁷. Pero es en el ámbito de las realizaciones bioquímicas donde el sentido del término “artificial” muestra más disparidad. Desde el sentido más débil del término, donde tenemos el caso de los organismos genéticamente modificados, que *sólo* son artificiales en el sentido de manipulaciones genéticas muy locales (operadas sobre organismos naturales), hasta el caso de las protocélulas sintéticas [Rasmussen et al (2008)] que exhiben ciertas propiedades biológicas y son plenamente artificiales, pues se fabrican a partir de componentes puramente moleculares.

Y en lo tocante a qué se debe entender por vida hay también una amplia disparidad: desde quienes postulan que los patrones de electrones de ciertos modelos computacionales (que exhiben propiedades similares a las biológicas, como ser capaces de evolucionar, adaptarse, etc.) se deben tomar literalmente por vida artificial, pasando por quienes piensan que lo vivo tiene que ser algo más “material” y capaz de interaccionar con un entorno físico, pero no estar necesariamente hecho de elementos bioquímicos, ni siquiera químicos (y por tanto, pueden ser robots), hasta quienes defienden que sólo creando sistemas químicos con macromoléculas similares a las de la vida que conocemos se podrán generar propiedades realmente biológicas (en la sección siguiente volveremos sobre esta cuestión). Y está además, el polémico status de toda una serie de sistemas materiales intermedios entre lo inanimado y lo vivo – que algunos autores [Etxeberria & Ruiz Mirazo (2009)] han propuesto denominar “transientes”.

Pero quizá no nos hemos puesto a pensar realmente qué significa intentar crear artificialmente vida. Como vamos a explicar, hay aquí una paradoja, si no una contradicción. Decimos que algo es artificial precisamente cuando es el resultado de la acción humana, manipulando y transformando lo natural (y externo a nuestro cuerpo) *de manera consciente y con un propósito específicamente humano*. No es artificial, por ejemplo, la transformación de un alimento natural a través de nuestra digestión, pues, aunque obviamente ese producto ha sido transformado bioquímicamente en nuestro organismo, no es resultado de un propósito consciente. En cambio, cuando transformamos minerales y fabricamos con sus derivados complejas máquinas para todo tipo de usos, sí decimos que los resultados de estas acciones son artificiales. Por eso, como el mismo Darwin señalara, la acción secular de agricultores y ganaderos manipulando selectivamente la reproducción de plantas y animales es una selección artificial (aunque eso no quiera decir que los organismos resultantes sean ellos mismos artificiales). Por tanto, lo artificial implica necesariamente la impronta de un diseño.

Y éste es justamente el punto donde reside el problema. Pues lo vivo es lo que está organizado por sí (sujeto) y para sí (objeto) mismo: la materia viva se *auto-repara*, se *auto-produce*, se *auto-reproduce*, se *auto-organiza*. Esto es así no sólo a escala del organismo individual sino ecológica y evolutivamente. Los seres vivos también transforman productos de la Naturaleza, pero para, con ellos, hacerse a sí mismos, mantenerse y proliferar. En otras palabras, la vida es auto-nomía y tiene su origen y continuidad en el curso de un proceso intergeneracional –evolución– que opera sin ningún plan ni diseño.

Se podría argüir que aun cuando un organismo sea resultado de una manipulación artificial, no por ello necesariamente perdería su condición de entidad biológica. Al fin y al cabo, como ya hemos dicho, las plantas agrícolas y los animales domesticados son en buena medida resultados de una cierta acción artificial en el proceso evolutivo que los ha generado. Y con mayor razón, los organismos modificados por la Ingeniería Genética. Ciertamente, un análisis un poco más detenido nos hace ver que el grado en que el hombre ha afectado a la evolución de estos organismos es mínimo. Incluso los más recientes logros de la BS (y exageradamente publicitados como creación de vida sintética) siendo cualitativamente mucho más impactantes, apenas han alterado una parte pequeña de su herencia genética natural [Gibson et al (2010), Annaluru et al (2014)].

Supongamos, sin embargo, como es probable, que se siga avanzando en esa línea hasta un punto en que se llegue a “reescribir” por diseño realmente la información genética de manera que ésta sea significativamente artificial, y obtengamos un organismo viable con semejante genoma. En realidad, lo que habríamos hecho es reprogramar radicalmente un sistema vivo natural, y sólo en ese sentido podríamos decir que tal sistema sería “sintético” o artificial. Pero esto no es lo mismo que fabricar un ser vivo a partir de elementos no-vivos. En este sentido, aun cuando el resultado de esa línea de investigación pueda llegar a producir sistemas vivos con propiedades que la Naturaleza nunca hubiera generado, el hecho de utilizar como punto de partida sistemas vivos naturales restringe el carácter “artificial” de tales sistemas.

Diferente desde luego sería generar un sistema vivo a partir de estructuras no-vivas. En este caso el proceso de creación artificial debería seguir las pautas que constituyen las bases organizativas de la propia vida natural: la organización de los seres vivos está llena de procesos como auto-ensamblaje y auto-organización, que dependen de la materialidad específica (por ejemplo, tipo de moléculas, tamaño de las “piezas”, etc.). El papel del diseño artificial sería el de guiar los procesos de auto-organización y auto-ensamblaje naturales (ver sección siguiente).

Sin embargo, hay un problema conceptual profundo aquí. Cuando nosotros, los humanos, intentamos fabricar vida (o ingredientes, mecanismos, módulos o subsistemas biológicos), en lugar de dejar la vida como está y permitir que ella misma se fabrique, interferimos con su naturaleza más íntima, con el *modus operandi* que la define. Kant (1790/1987) ya vio esta diferencia entre los artefactos humanos y las “máquinas naturales” que son los seres vivos. Mientras en los primeros las piezas existen independiente (y previa)mente a la totalidad, en los segundos partes y todo dependen mutuamente. Por ejemplo, las piezas de un coche existen independientemente de éste; pero los órganos de un ser vivo dependen unos de otros y se desintegran fuera del organismo. En el intento de fabricar vida artificialmente el investigador provoca una tensión en el sistema, y no resulta claro *a priori* si esta tensión se resolverá favorablemente o no, porque cualquier materialización artificial de un sistema biológico debe satisfacer la lógica de una entidad con capacidad para repararse, mantenerse y (re)producirse; en suma, ser una entidad *autónoma*. Es también esta autonomía lo que requiere que la vida sea el resultado de una cadena de acontecimientos que conle-

van modificaciones y reestructuraciones sucesivas en el tiempo – evolución– y no el resultado inmediato de un diseño. La autonomía es, de hecho, uno de los aspectos que distinguen radicalmente lo vivo de cualquier máquina o dispositivo diseñado por el hombre hasta la fecha. Por eso el intento de crear vida artificialmente conlleva una confrontación radical entre la creatividad intrínseca de la vida y la de los seres humanos [Ruiz Mirazo & Moreno (2013)].

La conclusión provisional que podemos sacar es que la dicotomía entre lo artificial y lo vivo es tan profunda que tal vez nunca lleguemos a conseguir fabricar artificialmente –en el pleno sentido de la palabra– algo que identifiquemos tan claramente con todas las potencialidades de la vida como son las células procariotas naturales.

III. LA MATERIALIDAD IMPORTA: O POR QUÉ LA BS REPRESENTA EL FUTURO DE LA VA

¿Qué significa afirmar que la organización fundamental de la vida es la autonomía? Se dice que un sistema es autónomo cuando se auto-determina, es decir, cuando se da a sí mismo las reglas que lo constituyen. En el ámbito de la transición entre lo no-vivo y lo vivo, un sistema será autónomo si construye y activamente mantiene las constricciones que lo constituyen [Moreno & Mossio (2015)]. La idea de autonomía captura las principales propiedades que manifiesta cualquier organismo vivo: (i) la auto-construcción (es decir, el hecho de que los seres vivos producen de forma continua, a través del metabolismo celular, los componentes que son directamente responsables de su comportamiento) y (ii) la acción funcional en y a través del entorno (es decir, el hecho de que los organismos han de usar su organización interna para modificar activamente sus condiciones de contorno con el fin de garantizar su propio mantenimiento como sistemas alejados del equilibrio [Ruiz Mirazo & Moreno (2012)]).

La VA ha intentado reproducir esta propiedad de la vida “sacando las manos” del diseñador fuera del sistema, es decir, tratando de diseñar sistemas que hicieran emerger sus propias reglas en lugar de idear programas detallados que guíen el comportamiento del sistema. El punto de partida siempre debería ser un conjunto de reglas simples (que se asimilan a unas condiciones prebióticas plausibles) pero que, no obstante, puedan generar de forma no trivial, propiedades nuevas

“biológicamente interesantes”. Sin embargo, y a pesar del enorme esfuerzo realizado en este campo [Forrest (1991), Crutchfield & Mitchell (1995), Brunner (2002)] los resultados han sido en la mayoría de los casos, muy genéricos o/y de poco interés biológico.

No hay una única razón para explicar este relativo fracaso⁸. Parte de la explicación habría que buscarla en el tipo de propiedades emergentes de muchos de los trabajos de la VA, generadas como resultado de un tipo de dinámica no-lineal de redes holísticas, más propio de sistemas físico-químicos que biológicos. La organización de estos últimos, por el contrario, no es el resultado de un proceso súbito de auto-organización no-lineal (como E. Fox Keller (2007) ha señalado), sino de la acumulación funcional de procesos históricos. El resultado de estos trabajos es que las propiedades generadas, más allá de un parecido aparente, no son realmente asimilables a las de los sistemas biológicos. Pero otra razón más fundamental del desinterés de buena parte de los biólogos hacia los trabajos de la VA reside, a mi entender, en la concepción puramente formalista de la organización biológica (compartida con, o heredada de, su antecesora, la Inteligencia Artificial). Vamos a explicar este punto, que nos parece crucial.

Para Langton, como señalábamos en la introducción, lo que define la vida es una forma de organización específica. El problema no es tanto esta idea formulada genéricamente, sino cómo se ha entendido. Dado que la VA se desarrolla en el marco de una tradición funcionalista radical, esta idea se ha entendido como que la organización biológica puede ser igualmente realizable en muy diferentes tipos de materialidad: tanto en elementos bioquímicos, como en un robot o en los electrones que implementan un programa de ordenador. Es decir, igualmente en un tipo de materialidad intrínsecamente activa que en otro tipo de materialidad carente de dinámica intrínseca [Moreno et al (1994)].

El intento de abstraer la organización de la vida de su base material olvida un hecho fundamental, y es que si algo muestra la biología es la profunda imbricación entre ambas. Por ejemplo, mientras que en los sistemas formales [Von Neumann (1949/1966)] la construcción y reproducción tiene lugar como una consecuencia lógica de la auto-descripción del sistema, en los seres vivos una gran parte de la información necesaria para la realización de estos procesos está implícita en la materialidad específica de sus componentes. La acción funcional de las proteínas no está completamente especificada por una secuencia

abstracta, sino que el hecho de que ésta lo sea de aminoácidos permite una riqueza en el plegamiento que es clave para la función⁹.

En la célula hay una multitud de ejemplos similares. En la formación de la membrana los procesos de auto-ensamblaje derivados de las características materiales de los componentes son claves. Por ejemplo, las membranas celulares se forman como una doble capa de fosfolípidos cuya estructura emerge espontáneamente debido a la acción de fuerzas de atracción y repulsión de ciertas moléculas particulares de las que están hechas dichas membranas –los fosfolípidos– cuando se encuentran en el medio acuoso. Unas moléculas son hidrófobas y otras hidrófilas y debido a ello se ensamblan de una forma muy determinada. Otro ejemplo, en este caso relacionado con un determinado tamaño, es el de la catálisis enzimática. Para que la catálisis se produzca el sitio activo de la enzima tiene que estar en contacto con el sustrato. Imagine el lector que tales objetos no fueran moleculares: haría falta adjuntar un dispositivo para guiar su movimiento en el medio acuoso. Afortunadamente no es así porque las enzimas son macromoléculas que se mueven aleatoria y espontáneamente debido a una ley física que se denomina “movimiento browniano”. Y así podríamos seguir enumerando otros muchos ejemplos.

La vida, tal y como la conocemos, es un fenómeno extremadamente “oportunista”, en el sentido de reclutar todas las propiedades que las leyes fisico-químicas generan cuando se encarnan en una muy determinada estructura material. Este es un hecho fundamental, que incluso ciertos ingenieros de robótica que intentan emular las propiedades vivientes empiezan a admitir. Como recientemente apuntaba Rolf Pfeifer, director del laboratorio de Inteligencia Artificial de la universidad de Zurich y uno de los investigadores más destacados en este área, para intentar reproducir artificialmente las características de los seres vivos, la robótica tiene que buscar materiales capaces de auto-organizarse, y el ingeniero debe buscar cómo “guiar” esa dinámica auto-generada, pues la vida es “auto-organización guiada” [Pfeifer et al (2007)]. Y ello es así porque la vida es una organización de componentes con una multitud de procesos dinámicos intrínsecos, sobre la cual operan unas determinadas constricciones que, por simplificación, vemos como una especie de “programa” y los identificamos con el ADN¹⁰.

LA BS asume implícitamente esta visión. Lo hace, por supuesto, en su línea de trabajo principal, cuando ella misma se define como una ingeniería radical operando sobre los organismos naturales. Pero in-

cluso en su versión menos “utilitarista” y de búsqueda de nuevas formas de vida, es decir, la rama de la BS que intenta crear sistemas con propiedades vivientes a partir de elementos no vivos, esta búsqueda se plantea partiendo de materiales bioquímicos muy similares a los de los seres vivos naturales. Como señalan en un reciente artículo J. Attwater y P. Holliger (2014), esta perspectiva es interesante para explorar la evolución prebiótica, pues puede permitir entender las potencialidades y límites de formas alternativas de organización bioquímica:

En principio, ni el metabolismo, ni la genética, ni siquiera la estructura celular deberían estar limitados por la química natural: las químicas inorgánicas y supra-moleculares pueden generar estructuras similares a las células y también procesos de crecimiento radicalmente diferentes de los observados en la biología. Asimismo, se pueden construir sistemas utilizando la estereoquímica opuesta a la de las formas de vida de hoy en día (“vida especular”) o usando ácidos nucleicos no naturales para el almacenamiento de la información genética, y aminoácidos no naturales para las proteínas u otro tipo de polímeros codificados secuencialmente. Estos enfoques, que divergen de aspectos históricos sobre los orígenes de la vida, podrían sin embargo revelar en qué medida las proteínas naturales y las químicas de ácidos nucleicos poseen propiedades excepcionales, representan compromisos entre la complejidad y la fidelidad, o por el contrario, reflejan la química prebiótica o la historia evolutiva [Attwater y Holliger (2014), p. 497].

Pero, como decíamos, el *modus operandi* más común de la BS es la búsqueda de una “caja de herramientas” de módulos genéticos bien definidos para construir nuevas funciones *en el marco de las formas de vida actualmente existentes*. Y ello no sólo porque generar propiedades biológicamente interesantes a partir de sistemas y estructuras puramente químicas es muy difícil, sino porque los investigadores que trabajan en BS saben que la organización de los seres vivos naturales es un “chasis” con unas potencialidades de ser manipulado extraordinarias.

Pero, ¿hasta dónde puede ser manipulado este chasis? En realidad, la propia vida natural nos puede dar la respuesta a esta pregunta. En el curso de la evolución biológica hubo un momento en que los organismos unicelulares dieron lugar a un tipo nuevo y superior de organismo, formado por muchas células, en las que éstas vieron cómo hasta su organización metabólica era modificada (“manipulada”) por mecanismos

epigenéticos intercelulares, incluso cambiando su destino reproductivo y siendo incapaces de vivir fuera del conjunto multicelular.

Mi argumento pues es que no cabe imaginar un mayor grado de intervención/manipulación en la lógica interna de una célula que la que sufren las que componen un organismo multicelular integrado: lo único que no es alterado es el núcleo básico de la organización autopoietica de la célula, porque ir más allá implicaría literalmente su destrucción como entidad viviente. Si al hablar de vida artificial o sintética decíamos que hay un límite en la intervención humana (puesto que cualquier materialización artificial de un sistema biológico debe satisfacer la lógica de una entidad con capacidad para repararse, mantenerse y (re)producirse), este límite lo ha explorado la propia evolución en la generación de organismos multicelulares.

Así que tenemos ya un modelo de hasta dónde se puede y no se puede manipular a un ser vivo. La enorme plasticidad que el núcleo fundamental de la vida natural ha mostrado durante los 3.500 millones de años de evolución permite pensar que las posibilidades de rediseñar artificialmente la vida natural son inmensas. Desde este punto de vista, la BS tiene unas altas probabilidades de convertir en realidad en un futuro próximo la idea de vida artificial.

IV. IMPLICACIONES: LA RELACIÓN DE LA ESPECIE HUMANA CON LAS DEMÁS Y LA DIMENSIÓN NO BIOLÓGICA DE LA “SOSTENIBILIDAD” HUMANA

Pero lo que no nos hemos planteado todavía es qué puede implicar para el futuro de la propia vida humana la creación y desarrollo de vida artificial. Para contestar a esta pregunta tan importante debemos comenzar por comprender la naturaleza de nuestro propio lugar en el mundo de la vida.

El hombre es una especie completamente distinta de las demás, pues su éxito se ha basado en el desarrollo de prótesis artificiales: el factor fundamental en el que se materializa la especificidad del proceso de hominización es la aplicación del incremento de las capacidades cognitivas a la manipulación de objetos para sus propios fines, produciendo un desarrollo sostenido de la elaboración de instrumentos (lo que incluye la transmisión por vía de la enseñanza de los conocimientos técnicos). Aunque hay otras especies cuya forma de vida incluye

un proceso constructivo externo que puede considerarse como uso instrumental de objetos (muchos insectos, aves, castores...), en los animales no hay evolución en el uso de tales instrumentos¹¹. Solo el hombre ha hecho del uso masivo y recursivo de instrumentos materiales complejos su forma de supervivencia. Los seres humanos han desarrollado el uso de múltiples unidades articuladas que encauzan la energía procedente de las más diversas fuentes (unas ajenas: fuerza muscular animal, saltos de agua, combustibles vegetales...y otras propias: arcos, resortes, palancas...) para producir *trabajo*. Es decir, mediante unas determinadas construcciones materiales –que denominamos máquinas– los hombres constriñen los flujos de energía disponibles en su entorno para su utilización en la forma, intensidad, dirección y duración que necesitan o desean.

Sin embargo, la evolución específicamente humana –la evolución ya no biológica sino exclusivamente tecno-cultural– es un proceso que socava la lógica ecológica, que se basa en la construcción de ciclos sostenibles constituidos sobre complementariedades de los flujos energético-materiales entre especies [Nunes-Neto et al (2014)]. En la medida en que las especies varían evolutivamente, los ciclos se reestructuran por re-adequación mutua entre especies. Ahora bien, en el caso de la evolución tecnológica de nuestra especie suceden dos cosas nuevas. Por un lado, como el cambio en las formas de interacción con las demás especies es cultural, no genético, la velocidad del mismo hace prácticamente imposible la re-adaptación complementaria por la mayoría de las demás especies. Y segundo, aún más importante, los mecanismos de gestión de los procesos energéticos y materiales que la especie humana ha ido desarrollando para organizar su propia supervivencia no son esencialmente biológicos, sino técnicos. Esto genera una desestabilización esencial de los ciclos ecológicos (en términos de materiales –deshechos– no reciclados, por ejemplo). Este problema, del que solo hemos empezado a tomar conciencia en las últimas décadas, tiene sin embargo raíces antiguas. Ya la revolución neolítica, con la extensión de la agricultura y ganadería, supuso una brutal disminución de la biodiversidad vegetal y animal. En consecuencia, el desarrollo tecnológico, tal y como lo hemos realizado, está destruyendo aceleradamente nuestro entorno biológico y socavando las condiciones de nuestra propia supervivencia.

He aquí pues un claro límite, que obliga a replantearnos todo el modelo de desarrollo tecno-cultural, del que el hombre moderno es re-

sultado. En otras palabras, si seguimos en el mismo tipo de proceso por el que nos hemos constituido como hombres, no somos una especie biológicamente sostenible. El problema de fondo es pues si la especie humana, que se ha desarrollado desestabilizando aceleradamente su entorno ecológico, puede ser capaz de idear y llevar a cabo un conjunto de relaciones con las demás especies que a) sea ecológicamente sostenible y b) nos permita llevar una vida razonablemente confortable para un número elevado de seres humanos.

Recientemente se están desarrollando trabajos serios para intentar diseñar políticas de desarrollo humano que tengan en cuenta la necesidad de mantener los equilibrios ecológicos, en lo que se conoce como la nueva disciplina de Sistemas Socioecológicos [Ostrom (2009)]. Ciertamente, estos enfoques aportan soluciones parciales, y muestran que la gestión de la relación conflictiva entre las formas de producción humana modernas y la sostenibilidad de los ecosistemas es manifiestamente mejorable aún dentro de la tecnología actual. Sin embargo, el alcance de estos enfoques es limitado, puesto que no encaran el problema de cómo sustituir el uso de las tecnologías no biológicas para asegurar una producción que permita una vida confortable a un número tan elevado de personas como las que poblamos actualmente el planeta. El problema no es resoluble apelando a tecnologías más poderosas, pues ninguna tecnología puede cambiar los dos problemas antes señalados. Es en este contexto donde creo que la BS tiene su futuro.

¿Cómo puede la BS contribuir a solucionar el grave problema ecológico provocado por el modo de vida de nuestra especie? Decíamos que, como el cambio en las formas de interacción con las demás especies es cultural, no genético, la velocidad del mismo hace prácticamente imposible la re-adaptación complementaria por la mayoría de las demás especies. A esto cabe responder con la BS, induciendo un cambio genético diseñado tecnológicamente para responder a la velocidad adecuada de forma re-equilibradora de los ciclos ecológicos. El otro problema que señalábamos era el de que los mecanismos de gestión de los procesos energéticos y materiales que la especie humana ha ido desarrollando para organizar su propia supervivencia no son esencialmente biológicos, sino técnicos. Y esto genera una desestabilización esencial de los ciclos ecológicos, no solo en forma de residuos no reciclables, sino por las alteraciones impuestas a los ciclos biológicos. A este segundo problema también puede hacerse frente con la BS,

pues lo característico de ésta es, como hemos dicho, la sustitución de una tecnología no biológica por otra biológica. Pues ciertamente, el principal objetivo de la BS es rediseñar las vías de síntesis biológica para producir fármacos, biocombustibles y otros productos de interés para nuestro modo de vida altamente tecnológico.

¿Qué quiere decir sustituir una tecnología no biológica por otra biológica? Fundamentalmente, que en lugar de manipular *procesos* (físicos, químicos o biológicos) con instrumentos/materiales no biológicos para obtener determinados fines humanos, se manipulan *biológicamente sistemas vivos* para que generen ciertas formas de vida artificialmente inducidas, las cuales generen productos y acciones que satisfagan a la vez condiciones de sostenibilidad ecológica y utilidad para el mantenimiento de nuestro modo de vida altamente tecnológico. Y esto es factible con la BS porque los procesos de producción en el marco biológico siempre se insertan en ciclos –en primer lugar, internos a los organismos (metabólicos), pero en segundo lugar, externos a éstos– es decir, en forma de complementariedades energético-materiales entre especies (ecosistemas).

En definitiva, solo la BS puede conseguir el objetivo de la sostenibilidad de la civilización humana porque solo ella puede operar a la vez en términos biológicos y al servicio de nuestras necesidades tecnológicas.

CONCLUSIONES

En el 2000, haciendo un primer balance de la VA, Mark Bedau (2000) formulaba estas tres cuestiones como los principales retos de esta disciplina: ¿Cómo surge la vida desde lo no vivo? ¿Cuáles son las potencialidades y límites de los sistemas vivos? ¿Cuál es la relación entre vida, mente, máquinas y cultura? Hoy, apenas transcurridos tres lustros de este balance, la dirección que está tomando la investigación impulsada por la BS en relación con la creación artificial de vida nos está cambiando también la forma de formular las preguntas. En lugar de focalizarnos sobre lo cognitivo, los interrogantes se tornan cada vez más sobre las consecuencias prácticas: ¿Qué puede significar para nuestro futuro la vida artificial?

Todo hace indicar que en un futuro próximo la BS va a generar una multitud de nuevos organismos diseñados para responder a nuestros

intereses. Generaríamos un conjunto de organismos artificiales –una “librería”– al servicio no sólo de nuestro cuerpo, sino también –y sobre todo– de restablecer equilibrios ecológicos. No tanto en el sentido de reciclar deshechos de nuestra tecnología no biológica, sino sobre todo para sustituir, en lo posible, las tecnologías no biológicas por otras biológicas. La evolución de la BS puede conducir de esta manera a una nueva forma de integración del hombre en la biosfera, en la que individuos humanos “naturales” y librería de organismos artificiales tendrían un nivel tan alto de integración como el de las células dentro de un organismo multicelular. Hasta la reproducción “humana” (y hay ya indicios) pasaría por esta forma integrada. La existencia de todas estas poblaciones de seres artificialmente creados y mantenidos dependería radicalmente de nosotros (nuestra intervención tecnológica). *Pero nuestra propia vida dependería también de la suya.* Y estaríamos convirtiendo la biosfera en una especie de gigantesco organismo socio-tecno-biológico.

A diferencia de los organismos multicelulares naturales, esta unidad socio-tecno-biológica no tendría estabilidad, sino que estaría en continua transformación (en función del ritmo de progreso científico). A su vez, en el plano de nuestra interacción con el entorno ecológico, usaríamos esas mismas técnicas para mejorar la mayoría de los procesos productivos y para intentar revertir la devastación ecológica que hemos desencadenado. Como dice Luis Serrano, director del Centro de Regulación Genómica (CRG) de Barcelona, “tenemos las herramientas para fabricar el material genético de un ser vivo, y por tanto la posibilidad de convertirnos en ingenieros de la vida. Es un momento apasionante donde se abren numerosas puertas y posibilidades para mejorar la vida humana y el medio ambiente; en los próximos años nos sorprenderemos de lo que veremos”¹². Así, quizás lo que nos vaya a deparar este futuro es una nueva biosfera poblada por una multitud de organismos tan profundamente manipulados por la acción del hombre que más parezcan piezas de una gran maquinaria humana que natural.

En definitiva, nos estaríamos cambiando radicalmente tanto a nosotros mismos como a la propia biosfera en su conjunto. Quizás el destino de la vida artificial sea salvar a nuestra especie del desastre ecológico. Pero al precio de terminar con la vida natural. Lo que está en juego es un cambio radical de la relación entre los humanos y la naturaleza. Por primera vez en la historia los seres humanos vamos a poder dirigir la evolución biológica, entrando así en un mundo de

grandes oportunidades y también riesgos desconocidos. Tal vez el proyecto de fabricar vida sea finalmente el más prometedor y arriesgado de las empresas tecnológicas de la historia de la humanidad.

*Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia
Universidad del País Vasco/Euskal-Herriko Unibertsitatea
Avda. de Tolosa 70, 20018, San Sebastián
E-mail: alvaro.moreno@ehu.es*

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la ayuda del Departamento de Educación, Universidades e Investigación del Gobierno Vasco (Proyecto IT-590-13) y del Ministerio de Industria e Innovación (Proyectos FFI2011-25665 y BFU2012-39816-C02-02).

NOTAS

¹ La VA fue creada por Christopher Langton en 1987 en una Conferencia titulada “Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems”, que tuvo lugar en el famoso Laboratorio Nacional de Los Alamos (USA) donde cuatro décadas antes se había desarrollado la primera bomba atómica [Langton (1989a)].

² Todo este programa de investigación dio lugar a una multitud de “criaturas” digitales que interactuaban adaptativamente, competían, cooperaban y evolucionaban de diferentes maneras. Para un resumen de los trabajos más significativos de la VA, junto a un análisis crítico de los mismos, ver Fernández y Moreno (1992) y Emmeche (1994).

³ Esta crítica, aun cuando tiene un fundamento, es demasiado simplista, pues la mayoría de los investigadores de la VA por lo general toman muy seriamente en cuenta, tanto en el diseño de sus modelos como en la evaluación de sus resultados, las teorías y los comportamientos presentes en el dominio empírico respectivo [Moreno (2002)].

⁴ PCR (en inglés *polymerase chain reaction* o reacción en cadena de la polimerasa) es una tecnología para amplificar una o varias copias de un trozo de ADN que genera miles de millones de copias de una secuencia particular de ADN.

⁵ Por ejemplo, el caso de la bacteria “artificial” del equipo de Venter [Gibson et al (2010)] o el más reciente de la levadura “artificial” por el equipo de Chandrasegaran [Annularu et al (2014)].

⁶ Un caso diferente es el de los sistemas de BS creados a partir de materiales no vivientes [Chen et al (2004), Solé et al (2007), Rasmussen et al (2008)]. En este caso, sí que el grado de artificialidad es fuerte; pero, en cambio, los sistemas generados, aunque presentan ciertas propiedades interesantes, están muy lejos de poder ser considerados como vivos.

⁷ Se trata de un término difícilmente traducible. La idea es crear sistemas que exhiban propiedades “similares” a las de los seres vivos, como por ejemplo, ser capaces de auto-reproducirse, evolucionar, adaptarse al entorno, etc. [Langton (1989)].

⁸ Sería sin embargo injusto afirmar que la VA ha aportado poco a la Biología Teórica, pues los numerosos e importantes debates filosóficos que ha suscitado han contribuido a avanzar en la construcción de una biología de “la vida-como-debe-ser” y no sólo de “la vida-como-la conocemos”.

⁹ Las secuencias de nucleótidos del ADN generan casi siempre el mismo tipo de plegamiento helicoidal, mientras que las secuencias de aminoácidos de las proteínas generan una enorme variedad de estructuras tridimensionales en el plegamiento. Y sin embargo, en términos puramente formales una secuencia de por ejemplo 300 nucleótidos contiene más información que una de 100 aminoácidos (éste viene a ser el tamaño de una proteína).

¹⁰ En última instancia, estas constricciones son también generadas por los propios seres vivos, sea a escala ontogenética o filogenética.

¹¹ Aunque algunos grupos de chimpancés han desarrollado también técnicas de manipulación de instrumentos cuyo conocimiento transmiten de generación en generación, sólo los seres humanos han sido capaces de un desarrollo *sostenido* de instrumentos técnicos cada vez más complejos.

¹² *El País*, 6 de abril de 2014.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AA.VV. (2014), *Focus Issue on Synthetic Biology. NatureMethods*.11 (5), pp. 463-592.
- ANNALURU, N. ET AL. (2014), “Total Synthesis of a Functional Designer Eukaryotic Chromosome”; *Science* 344 (6179), pp. 55-58.
- ANDRIANANTOANDRO, E., BASU, S., KARIG, D., & WEISS, R. (2006), “Synthetic Biology: New Engineering Rules for an Emerging Discipline”; *Molecular Systems Biology* 2006.0028; doi: 10.1038/msb4100073.
- ATTWATER, J & HOLLIGER, P. (2014), “A Synthetic Approach to a Biogenesis”, *Nature Methods* 11(5), pp. 495-498.
- BEDAU, M. (2000), “Artificial Life VII: Looking Backwards, Looking Forwards”; *Artificial Life* 6(4), pp. 261-264.
- BENNER, S. A., & SISMOUR, A. M. (2005), “Synthetic Biology”; *Nature Reviews Genetics*, 6, pp. 533-543.

- BRUNNER, K. A. (2002), "What's Emergent in Emergent Computing?"; *Cybernetics and Systems 2002: Proceedings of the 16th European Meeting on Cybernetics and Systems Research* 1. Viena, pp. 189-192.
- CASTI, J. (1997), *Would-be Worlds. How Simulation is Changing the Frontiers of Science*; Nueva York; John Wiley.
- CHEN, I. A., ROBERTS, R. W., & SZOSTACK, J. (2004), "The Emergence of Competition Between Model Protocells"; *Science* 305 (5689), pp. 1474-1476
- CRUTCHFIELD, J. P. & MITCHELL M. (1995), "The Evolution of Emergent Computation" *Proceedings of the National Academy of Sciences* 92 (23), pp. 10742-10746.
- EMMECHE, C. (1994), *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life*; Princeton, Princeton University Press. (Trad. española: *Vida simulada en el ordenador: la nueva ciencia de la vida artificial*. Gedisa, Madrid 1998).
- ENDY, D. (2005), "Foundations for Engineering Biology" *Nature*, 438, pp. 449-453.
- ETXEBERRIA, A. (2008), "Abstract Organization and Material Parts in ALIFE and Synthetic Biology" In S. Bullock, J. Noble, R. A. Watson, and M. A. Bedau (eds.), *Proceedings of the 11th International Conference on Artificial Life, Alife XI*; MIT Press, Cambridge, MA. p. 764.
- ETXEBERRIA, A & RUIZ MIRAZO, K (2009), "The Challenging Biology of Transients. A View from the Perspective of Autonomy"; *EMBO Reports* 10(1), pp. 33-36.
- FERNÁNDEZ, J. y MORENO, A. (1992), *Vida artificial*, Eudema, Madrid. (Trad. francesa: *La vie artificielle*, Seuil, Paris (1997).
- FORREST, S. (1991) (ed.), *Emergent Computation. Self-Organizing, Collective, and Cooperative Phenomena in Natural and Artificial Computing Networks*; Cambridge, MA: MIT Press.
- GIBSON, D. G. ET AL (2010), "Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome"; *Science* 329 (5987), pp. 52-56.
- HORGAN, J. (1995), "From Complexity to Perplexity"; *Scientific American*, June 01, 272, 6, pp. 104-109.
- KANT, E. (1790/1987), *Kritik der Urteilskraft (Critique of Judgment*. Indianapolis; Hackett Publishing).
- KELLER, E. F. (2007), "The Disappearance of Function from 'Self-Organizing Systems'"; en: Boogerd, F. Bruggeman, J-H. Hofmeyr, and H. V. Westerhoff (eds.), *Systems Biology: Philosophical Foundations*, Elsevier. Amsterdam, pp. 303-317.
- (2009) What Does Synthetic Biology Have to Do with Biology? *BioSocieties* 4, pp. 291-302.
- LANGTON, C. G. (1989a) (ed.), *Artificial Life*; Addison-Wesley, Redwood City CA.

- (1989b), “Artificial Life”; en Langton, C. G.(ed.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City CA., pp. 1-47.
- (1992), *Artificial Life*; Addison-Wesley.
- (1998) *Artificial Life: An Overview*, Cambridge, Mass., MIT Press.
- MORENO, A., ETXEBERRIA, A., & UMEREZ, J. (1994), “Universality Without Matter?; en R. Brooks & P. Maes (eds.) *Artificial Life IV*, Cambridge Mass., MIT Press. pp. 406-410.
- MORENO, A. (2002), “Artificial Life and Philosophy”; *Leonardo* 35(4): pp. 401-405
- MORENO, A. & MOSSIO, M. (2015), *Biological Autonomy: a Philosophical and Theoretical Enquiry*; Springer (en prensa).
- NEUMANN J. VON (1949 [1966]), *Theory of Self-Reproducing Automata*; Burks A. W. (ed), University of Illinois, Urbana.
- NUNES-NETO, N. F., MORENO, A. & EL-HANI C. N. (2014), Function in Ecology: an Organizational Approach; *Biology and Philosophy* 29(1), pp. 123-141.
- OSTROM, E. (2009), “General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems”; *Science*, 325, pp. 419-422.
- PERETÓ, J. & CATALÁ, J (2007), “The Renaissance of Synthetic Biology”; *Biological Theory* 2(2), pp. 128-130.
- PFEIFER, R., LUNGARELLA & M., IIDA, F. (2007), “Self-Organization, Embodiment, and Biologically Inspired Robotics”, *Science*, 318, pp. 1088-1093.
- RASMUSSEN, S., BEDAU, M. A., CHEN, L., DEAMER, D., KRAKAUER, D. C. & PACKARD, N. H. (eds.) (2008), *Protocells: Bridging Nonliving and Living Matter*; Cambridge, Mass., MIT Press.
- ROSEN, R. (1991), *Life Itself: A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin and Fabrication of Life*; Nueva York, Columbia University Press.
- RUIZ-MIRAZO, K. & MORENO, A. (2012), “Autonomy in Evolution: from Minimal to Complex Life”; *Synthese* 185(1), pp. 21-52.
- (2013), “Synthetic Biology: Challenging Life in Order to Grasp, Use, or Extend It”; *Biological Theory* 8, pp. 376-382.
- SERRANO, L (2007), “Synthetic Biology: Promises and Challenges”; *Molecular Systems Biology* 3, p. 158.
- SIMON, H (1969), *The Sciences of the Artificial*; Cambridge MA, MIT Press.
- SOLÉ, R. V., MUNTEANU, A., RODRIGUEZ-CASO, C., & MACÍA, J. (2007), Synthetic Protocell Biology: From Reproduction to Computation”; *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 362, pp. 1727-1739.