



Aproximaciones a los Sistemas Complejos: Adaptación y Sistemas Autocatalíticos

Walter Riofrío Ríos

Resumen

El artículo se centra en un estudio sobre la relación que se produce entre los procesos de adaptación y los sistemas catalíticos. Ello nos permite analizar también las nociones de espontaneidad, consumo de energía y síntesis molecular en ambientes abiogénicos. Tendrá especial atención, en lo relativo a sus implicancias para la evolución en el marco de los sistemas complejos, el estudio de las propiedades que presentan los sistemas autocatalíticos supracríticos. Así, podremos afirmar que los procesos de adaptación no se encuentran dirigidos exclusivamente por la selección natural, pues la lógica interna de estos sistemas impone ciertas condiciones al medio circundante.

Introducción

Los diferentes desarrollos recientes en las investigaciones sobre los fenómenos vivos, enmarcados en el programa de los sistemas complejos, nos permiten entender de un modo más profundo ciertas propiedades que hasta hace poco se venían analizando exclusivamente desde una perspectiva reduccionista.

Consideramos que es de especial interés para las reflexiones en filosofía de la biología, ahondar en los fundamentos de cómo los procesos de adaptación en la evolución biológica han producido a los seres vivos en el interior de un universo controlado por los cuatro campos fundamentales (el campo fuerte, débil, gravitatorio y electromagnético), junto con el incremento de la entropía que predice la segunda ley de la termodinámica.

De este modo, la realización de una exploración conceptual en donde se relacionen las investigaciones sobre los sistemas irreversibles con la propuesta teórica que postula el profesor Kauffman, nos puede brindar clarificaciones inmersas en un renovado contexto, acerca de los fundamentos básicos que edifican a la teoría biológica como un todo.

Por estas razones, nos concentraremos en un análisis filosófico sobre los lineamientos básicos o iniciales que se requieren edificar en trabajos de mayor aliento, para poder vérselas con el análisis conceptual que permitiría ampliar el universo de explicación de los fenómenos biológicos. Veremos que estas propuestas nos permiten integrar de nuevas maneras a ciertas propiedades y ciertos procesos biológicos que no parecían tener una total coherencia en el interior de la teoría darwiniana tradicional.

Me refiero, de manera especial, a las relaciones conceptuales que se establecen entre el proceso que es guiado por la selección natural y que actúa sobre ciertas características o rasgos supuestamente ventajosos, que son producto de la omnipresencia de las mutaciones en los genomas de cualquier especie biológica y la existen-

cia de las propiedades de un universo con la tendencia irreversible al aumento del desorden.

La clausura catalítica

Empezamos nuestra disquisición planteando las siguientes cuestiones previas: según los trabajos de Ludwig Boltzmann, las leyes de la físico-química (en especial, la segunda ley de la termodinámica), nos imponen ciertas restricciones. Recordemos el enunciado básico de la segunda ley que habla de la entropía de un sistema. En los sistemas en equilibrio la entropía siempre va en aumento. Esto quiere decir que, dado un sistema y todos sus posibles estados, la segunda ley nos predice que el sistema pasará estadísticamente por todos ellos, sin preferencia a ninguno. Esto es conocido como la **hipótesis ergódica**.

Desde el punto de vista molecular, podemos visualizar esta ley como prediciendo que las moléculas se distribuirán uniformemente en un cierto contenido. Tomemos un ejemplo clásico, un vaso lleno de agua al que le añadimos una gota de tinta azul. Según la ley de la entropía, conforme el tiempo vaya pasando las moléculas de la tinta se distribuirán de manera uniforme -estadísticamente hablando-. Llegará el momento en que el vaso con agua sea completamente teñido de azul. Esto quiere decir, que todas las moléculas de la tinta se han difundido en más o menos igual concentración por todo el recipiente. Aquel estado que predice a todas las moléculas de la tinta azul en el borde inferior derecho es un estado altamente improbable que suceda de manera espontánea.

Por espontáneo nos referimos a aquellos fenómenos que se producen en el fluir del tiempo sin ninguna intervención de agentes externos que puedan *producir un cierto trabajo*. Así, si dejamos un pedazo de hielo en una mesa con el pasar del tiempo se derretirá, o, un automóvil nuevo dejado en nuestra casa y esperando unas décadas sin moverlo, se irá deteriorando. Los ejemplos son innumerables y algunos más disparatados que otros.

Muchas veces se parafrasea a la ley de la entropía como a la ley que predice la disminución del orden en un sistema. Todo lo existente en el universo a partir de la escala molecular, se encuentra regido por esta ley.

De este modo, parece ser que naturalmente el orden es bastante improbable. Pero, si nosotros los seres vivos, somos entes altamente ordenados ¿cuáles son las razones válidas que nos permiten existir en un universo con estas características?

Los intentos para revertir esta aparente incongruencia se han realizado, clásicamente, enfocando el problema adscribiéndolo a la búsqueda sobre el origen de la molécula molde que se replica. Ello nos lleva, por un lado, a la reducción del fenómeno de la vida (visto desde sus orígenes), como dependiendo fundamentalmente de la instanciación de una propiedad; a saber, la propiedad replicativa. Lo que es más, el biólogo tradicional considera que es necesario realizar toda investigación para ahondar sobre cómo pudo surgir la única posible instanciación de esa propiedad: la aparición de los ancestros moleculares de los actuales ácidos nucleicos.

De otro lado, se realiza una apelación poco fundamentada a la noción de azar y probabilidad tal que se exageran las capacidades del ensayo y error para el ensamblaje de las partes de una estructura molecular que; de por sí, debería de contener cierta lógica interna de coherencia que no es tomada en cuenta. En consecuencia, el problema inicial es derivado a otros problemas que terminan diluyendo y como "ocultando" la incongruencia original.

En uno de sus últimos trabajos, Stuart Kauffman nos refiere que desde principios de los años setenta (desde 1971), se encontró investigando sobre el problema del origen de la vida y en este respecto se planteaba serias dudas acerca de la asunción estándar: que la vida y sus orígenes dependieran tan fundamentalmente de las moléculas molde de ácidos nucleicos tales como el ADN o el ARN. De este modo, aquí

surge una interrogante cuando consideramos que la vida, en esencia, depende de la reproducción.

A este respecto, Kauffman nos indica que al hablar de reproducción no estaríamos queriendo decir otra cosa más que autocatálisis y, por tanto, "...¿Podrían haber leyes generales que apoyen la posibilidad que los sistemas de polímeros catalíticos, como las proteínas, pudieran ellos mismos estar autoreproduciéndose?..." [Kauffman, (2000), pp. 15].

Son muy pocas las veces que en la historia de la ciencia podemos asistir a estos giros conceptuales que terminarán minando desde sus cimientos los supuestos básicos de una teoría científica, para poder acceder a un nuevo desarrollo de esa ciencia (pongámonos a pensar en la historia de la física). Pero aquí no estamos en frente de un cambio de paradigma, como afirmaría Kuhn o algún pensador similar.

En realidad, las nociones de "paradigma", o, "cambio de paradigma", no logran describir ni tampoco vislumbrar lo que viene sucediendo desde mediados de los años setenta, no sólo en la biología sino en todas las ciencias en su conjunto.

Aún más, podemos afirmar que esta nueva manera de aproximarse a la realidad, está provocando que en todas las distintas maneras en que el ser humano toma contacto con el mundo se encuentre produciéndose cambios rápidamente.

Y todo ello, es el producto de haber dejado de aceptar la aproximación que propugna el programa reduccionista, que se instauró en occidente desde principios del siglo XVII, predominando en nuestro pensar hasta hace unos pocos años.

La aceptación del programa de los sistemas complejos implica mucho más que un cambio de paradigma. Pues todo cambio de éste, siempre se dio con la tácita aceptación del programa reduccionista, que de una u otra manera aparecía en nuestras referencias a la realidad.

Pero se tiene que decir que no es propósito central del presente estudio realizar un debate sobre este tema importante desde el punto de vista tanto epistémico como ontológico. Tarea que sobrepasa los límites de lo que propongo. Sin embargo, me parece interesante el por lo menos haberlo indicado, con la intención de animar quizá a algún otro investigador a emprender esta tarea, o me anime a mí el realizarlo en un trabajo posterior.

Pero ahora, quisiera continuar con el mencionado cambio conceptual que indicaba líneas arriba: *la equivalencia entre el concepto de reproducción y su equiparación con la noción de autocatálisis*.

En el mundo molecular existe una característica general; a saber, que a veces las moléculas entran en una dinámica de interacción química, conocida como reacciones químicas. En esta dinámica molecular, las moléculas terminan por intercambiar sus interacciones químicas que pueden dar a lugar a la aparición de nuevas estructuras químicas, que antes no estaban en ese ámbito espacial. Catalizar una reacción química es hacer que esto mismo se produzca más rápidamente y de modo más estable en el tiempo.

La noción de autocatálisis resulta un tipo particular de catálisis. En donde, la resultante de estos procesos moleculares, es la producción de la misma estructura molecular que ingresó a la dinámica de su propia formación química. Esto es otra manera de decir que esa estructura molecular ha producido su propia reproducción.

A la luz de este giro conceptual, podemos constatar que es posible ampliar el universo del discurso al aproximarnos a lo que por instanciación de una propiedad entendemos. En las visualizaciones reduccionistas, es bastante común establecer que una estructura en particular es la depositaria de una determinada propiedad; para nuestro caso en estudio, la propiedad de reproducción se encuentra unívocamente relacionada a los ácidos nucleicos (o, sus ancestros remotos en la época pre-biótica de la tierra).

Pero esto es precisamente lo que Kauffman no está dispuesto a aceptar. Al inicio de la segunda parte de su libro "The Origins of Order" nos dice: "El origen de la

vida, más que haber sido algo altamente improbable es, en vez de ello, una *propiedad colectiva de un sistema complejo de polímeros catalíticos* y moléculas sobre los que actúa...Si esto es correcto, entonces las rutas de la vida son muchas y su origen es profundo pero simple." (las cursiva es nuestra), [Kauffman, (1993), pp. 285].

En la cita se menciona, en primera instancia, que investigar sobre el origen de la vida requiere poner el acento sobre el origen del metabolismo, antes que sobre el origen de la molécula molde que se replica. El sistema complejo de polímeros catalíticos expresa, concretamente, la importancia de empezar a considerar la aparición de las propiedades en el universo como **un fenómeno emergente** a la interacción de un conjunto de entidades tomadas colectivamente y no reducible a ninguno de los componentes de esa colectividad considerados aisladamente.

Unas líneas más adelante en la misma página, Kauffman nos plantea una cuestión que se enfrenta abiertamente a las concepciones tenidas como las más inamovibles en la biología estándar y pone en cuestión la asunción que se encuentra en el corazón de los conocimientos e investigaciones que se vienen desarrollando desde la segunda mitad del siglo XX y que se resumen en el famoso "dogma central de la biología molecular". En otras palabras, que tanto la reproducción como la evolución de los seres vivos se encuentran indisolublemente unidos al genoma de estos seres vivos.

Es así que el profesor Kauffman, al referirse a los sistemas complejos de polímeros catalíticos, nos afirma que estos sistemas moleculares pueden en principio "reproducirse y evolucionar sin la necesidad de tener un genoma" [Kauffman, (1993), pp. 285].

Más adelante en el trabajo nos dedicaremos a investigar las consecuencias de esta última referencia, pero ahora es nuestro interés el realizar una exploración de las implicancias del título del presente párrafo; es decir, aquello que engloba la noción de clausura catalítica.

Un sistema complejo de polímeros autocatalíticos necesita de ciertos requerimientos para que se pueda formar un conjunto autocatalítico de péptidos o de ribozimas. Veamos que para Kauffman no resulta imprescindible hablar de alguna estructura molecular en particular (no resulta importante poner el acento en tal o cual molécula en especial, sea esta una proteína o un ácido nucleico, o alguna otra), lo que sí resulta importante es realizar nuestro enfoque sobre el conjunto de estructuras moleculares que cada una puede tener o no la propiedad catalítica, pero están conectadas en reacciones químicas emparentadas; unidas entre sí.

De la interconexión entre las reacciones químicas es sobre lo que nos insta a preocuparnos. Por poner un ejemplo ilustrativo, observemos y analicemos una ruta metabólica tan representativa para el bioquímico tal como la glicólisis: la vía catabólica en donde se degrada la glucosa hasta lactato en los organismos anaerobios y hasta dióxido de carbono y agua en los aeróbicos. Sobre lo que significa desde el punto de vista formal esta ruta metabólica, es de la máxima importancia para Kauffman.

Entonces, las condiciones o requerimientos necesarios para que el conjunto de polímeros autocatalíticos se produzca o emerja en nuestro universo y se establezca como fenómeno físico que tendrá efectos posteriores para la historia del universo físico, serían:

- 1) Los péptidos y los polipéptidos deben ser capaces de catalizar la formación y el rompimiento de los enlaces peptídicos; las ribozimas deben ser capaces de catalizar la formación y el rompimiento de los enlaces entre los nucleótidos. Requisito que es ampliamente conocido entre los investigadores en bioquímica y biología molecular.
- 2) Para considerar que el conjunto autocatalítico de péptidos o moléculas de ARN jugaron un papel importante en la evolución pre-biótica, es necesario que la formación abiogénica de tales polímeros capaces de catalizar la for-

- mación y rompimiento de enlaces peptídicos tanto como enlaces fosfodiéster, debe ser factible.
- 3) Con el objeto de que estas reacciones ocurran efectivamente, las moléculas reaccionantes deben de estar confinadas en un pequeño volumen.
 - 4) Debe de producirse un flujo de síntesis de péptidos grandes a partir de un conjunto de aminoácidos monoméricos, de pequeños péptidos, u otras moléculas, y que todo esto sea termodinámicamente factible; lo mismo debería ocurrir para los polímeros de ARN.
 - 5) La clausura catalítica debe haber sido alcanzada y mantenida.

Aunque Kauffman se encargará de explorar con cierto detalle cada uno de estos requisitos y su correlato empírico, nosotros solamente nos dedicaremos a presentar un breve resumen de lo más indicativo que menciona. Para el caso del requisito 2), Kauffman menciona que es plausible el origen abiogénico tanto de péptidos como de estructuras moleculares proteínicas, que pueden llevar a cabo una gran variedad de actividades catalíticas [Fox, S.W.; Nakashima, T. (1980); Scott, J.K.; Smith, G.P. (1990) . Citados en Kauffman, (1993)].

Para el caso de las secuencias de ARN que contengan estas capacidades, los reportes científicos permiten concluir que son algo más difíciles de producirse como anota Orgel [Orgel, L.E. (1987). Citado en Kauffman, (1993)], pero en general se considera que no es algo excesivamente bajo en probabilidad [Tuerk, C.; Gold, L. (1990). Citado en Kauffman, (1993)]; por tanto, también se pueden asignar órdenes de magnitud similares a los de los péptidos.

En el caso del requisito 3), la lógica nos indica rápidamente que las reacciones químicas no pueden producirse de manera efectiva y eficiente, a menos que exista una razonable concentración de las especies moleculares involucradas en esa reacción. Pero de manera más decisiva se encuentra el hecho de que se produzca un cierto "aislamiento", tal que ahora tengamos la posibilidad de hablar de un "interior" y un "exterior".

La casi totalidad de las actuales y posibles reacciones químicas se producen en solución acuosa; el agua es un condicionante necesario para la dinámica de las reacciones químicas. Pero mucho solvente (agua), hace que el soluto (el conjunto de compuestos químicos que en solución llevarán a cabo las reacciones) se encuentre cada vez más y más diluido, esto limita o disminuye grandemente la efectividad de la reacción química en particular. Lo que se necesita es, por tanto, lograr que no se produzca una dilución sino una concentración de los compuestos químicos. Una barrera física que distinga un lado interno y otro lado externo que impida el ingreso de agua, con el fin de lograr un aumento de la concentración de los reaccionantes, se logra con la formación de una capa bilipídica.

La síntesis entrópicamente favorecida de los liposomas es casi una rutina en los laboratorios de investigación. Por tanto, la formación de lo que llamaré una proto-membrana plasmática es un fenómeno físico perfectamente factible en nuestro universo.

Respecto del requisito 4), resulta particularmente inesperado por una tradición de pensamiento que se alinea bajo el dicho "*catabolismo: producción de energía; anabolismo: consumo de energía*", que se vengán dando reportes [Silver, M.S.; James, S.L.T. (1981); Fruton, J.S. (1982). Citados en Kauffman, (1993)] sobre la preferencia desde el punto de vista termodinámico de la formación de enlaces peptídicos respecto de la ruptura de los mismos. Esta preferencia no requiere del aporte energético del exterior a la reacción.

Entonces, no es totalmente correcto que el anabolismo o formación de enlaces requiera siempre del aporte energético (en la forma de ATP, o algún otro compuesto similar). Lo que se viene reportando en la investigación biológica, es que basta con deshidratar el medio o asimilarlo a una superficie hidrófoba para que la reacción for-

mación-ruptura de enlaces peptídicos, se desplace termodinámicamente hacia la dirección de la formación del enlace. Lo que sí se necesita es del aporte continuo de aminoácidos o, péptidos de cadena corta. Creo que es necesario realizar una aclaración más precisa.

Una reacción química contiene dos zonas: la de los reaccionantes y la de los productos. En el tema que tocamos, la zona de formación de enlaces y la zona de ruptura de los mismos. Normalmente, una reacción química obtiene el equilibrio termodinámico cuando la velocidad de reacción de los reaccionantes es igual a la velocidad de reacción de los productos. Esto conlleva el resultado de que por cada interacción química de los reaccionantes para dar a lugar productos, se produce una interacción química de los productos para dar a lugar reaccionantes.

El efecto neto, es que las concentraciones de los reaccionantes y de los productos ya no varían en el tiempo. Una catálisis enzimática o de algún otro tipo, lo único que logra es llevar más rápidamente a este equilibrio químico y termodinámico. Dependiendo de las condiciones, una reacción química en particular privilegia una de las dos zonas de modo tal que sea favorecida termodinámicamente: la noción de espontaneidad se desplaza a un lado o hacia el otro (lo que se conoce como entrópicamente favorecido).

Por mucho tiempo se ha venido defendiendo que lo entrópicamente favorecido es lo correspondiente a la ruptura del enlace, antes que la formación del mismo.

Pero las conclusiones que se pueden derivar de los experimentos citados, es que ciertas condiciones del medio en que ocurren estas reacciones de formación-ruptura de enlaces peptídicos favorecen entrópicamente la formación de enlaces, sin mayor aporte de energía (está claro que un aporte de energía volvería mucho más eficiente y eficaz el aumento de uniones entre los aminoácidos). Por tanto, la probabilidad de obtener en circunstancias abiogénicas la formación de grandes cadenas polipeptídicas, no se encuentra precisamente en un rango bajo.

En cuanto al quinto y último requisito, Kauffman nos invita a considerar una unidad bastante similar a una célula primitiva: una membrana bilipídica que pueda aislar el interior del exterior, una dotación de insumos (especies moleculares) continua y, por último, una red de reacciones cerrada sobre sí misma.

Con respecto a esto, les propongo que comprendamos lo que significa la clausura catalítica realizando un modelo a partir del ciclo de Krebs o de los ácidos tricarbóxicos [Lozano, J.A. et al (1997)]. Como todo ciclo de reacciones, el primer elemento considerado como iniciador del ciclo es también el último elemento del mismo ciclo. Vale decir, cualquier componente de la clausura catalítica es en un determinado momento un reaccionante, pero también es un producto; también puede ser un catalizador de alguna reacción. Lo importante es que este ciclo sea auto-sostenible, autónomo, y que pueda obtener sus insumos de algo que podamos nombrar como lo exterior a este ciclo (aislado este ciclo o esta clausura catalítica por medio de esta membrana bilipídica, quizá con algunas cadenas polipeptídicas incrustadas en ella que permitan el pasaje de moléculas hidrofílicas).

Como vemos, la posibilidad de que durante los procesos que acompañaron la formación del planeta Tierra se produjeran también algunos procesos que **están fuertemente** emparentados con los albores de la vida en nuestro planeta, no parece ser algo tan alejado como hasta hace unas pocas décadas se consideraba. Parece, entonces, que los umbrales o condiciones que tienen que ver con la posibilidad de formación de un cierto metabolismo, se encuentran en el ámbito de lo racionalmente postulable.

Al borde del abismo

Otro de los conceptos que utilizará Kauffman es el de "edge of chaos". Tenemos pues que ubicar este nuevo concepto en el marco conceptual de su teoría. Pero lo primero que nos impele a tratar es su relación con dos conceptos que ya se usan casi de modo cotidiano en muchas disciplinas científicas; me refiero a los conceptos de orden y caos. No pretendo brindar una disertación sobre un tema que ha venido siendo objeto de múltiples enfoques, desde diversas perspectivas [Costa, N. C. A. da, Doria, F. A. and Furtado do Amaral, A. F. (1993); Prigogine, I.; Stengers, I. (1984); Bak, P. (1996)].

Lo que sí quiero puntualizar es que Kauffman -al igual que muchos investigadores en la actualidad-, reclaman que la vida se origina (y se mantiene en el tiempo) como un fenómeno físico en la intersección de estos dos polos opuestos.

La noción de orden, se visualiza como una característica que no admite ningún tipo de asimetría en las partes o componentes de eso que está ordenado. Dicho de otra manera, cualquier fenómeno que suponemos se encuentra ordenado, no admite variaciones de esa estructuración de ordenamiento ni en el espacio, ni en el tiempo; es un invariable.

En el otro extremo, tenemos al caos que normalmente se le considera como el no-orden o desorden. Si en el orden se habla de una total simetría, entonces, en el caos o desorden encontraremos una total asimetría.

Tomando un ejemplo clásico, podemos imaginarnos un recipiente conteniendo un volumen de gas. Si tenemos a todas las moléculas del gas ubicadas, digamos, en el centro geométrico del recipiente formando una esfera tridimensional perfecta, decimos que ese sistema gaseoso se encuentra ordenado. Por el contrario, si tenemos a ese mismo volumen de gas ocupando completamente cada uno de los espacios del recipiente, decimos que ese sistema gaseoso se encuentra caótico o desordenado.

Tomando otro aspecto, podemos vislumbrar la distribución de las moléculas del gas. En este caso, cuando analizamos el sistema caótico nos encontramos que la distribución de las moléculas es homogénea en el espacio y el tiempo (también un invariable); no resulta importante el que nos estemos preocupando de lo que le ocurre a cada molécula en particular. Para el caso del sistema ordenado, la distribución claramente no es homogénea pues se encuentran ubicadas en una región en particular del recipiente.

Desde otra perspectiva -la termodinámica-, encontramos que el sistema caótico es el más probable en ausencia de alguna fuente externa de energía; decimos que es el estado espontáneo pues el valor de la entropía ha crecido respecto del estado inicial (cuando recién se instaló el gas en el recipiente). Para el caso de las moléculas del gas en el estado ordenado, en ausencia de fuentes externas de energía se nos presenta como un estado altamente improbable o nada espontáneo.

Si efectivamente existe un estado como el descrito, entonces, indefectiblemente debe de existir alguna fuente de energía dirigiendo o normando el acomodo o distribución de cada molécula. Mejor dicho, el estado energético de cada molécula en unión con una dirección vectorialmente dirigida debe existir afectando de manera constante a la masa de gas.

El razonamiento termodinámico anterior, se encuentra basado en los argumentos edificados a partir de la termodinámica clásica; es decir, la construcción de los conceptos y las ecuaciones matemáticas que los representan en las famosas tres leyes enraizadas sobre el sistema aislado (sistema que no intercambia ni materia ni energía con su entorno). Es por ello que las distintas interpretaciones de la segunda ley que se refiere a la entropía, al aumento de la entropía en un sistema aislado, se

refieren a la espontaneidad de los procesos en un sistema como dirigidos en el tiempo hacia el aumento de la entropía.

Este aumento de la entropía se le interpreta como aumento del desorden, como disminución de información, en el sistema conforme pase el tiempo. Esta es la razón por la que también se la considera como la flecha del tiempo: el futuro del universo es camino hacia el desorden.

Es completamente comprensible que en un marco como el que acabo de resumir, el fenómeno de la vida resulte ser algo totalmente inesperado, un accidente afortunado, un gran premio de la lotería de los sucesos en el universo. Es altamente improbable que de manera natural, espontáneamente, nuestro universo pueda generar fenómenos físicos con el grado de complejidad y ordenamiento de que hacemos gala nosotros los seres vivos (y no hablemos de lo exquisitamente complejo que es nuestro cerebro humano).

Por ello, también, es completamente comprensible que inmersos en un contexto tan amplio y profundo como lo es la fundamentación filosófica del reduccionismo y el determinismo, las conceptualizaciones o vislumbres teóricos que se realizaron -tomando en cuenta este marco conceptual amplio- tuvieran primero que privilegiar la estructura que actualmente se encarga de transmitir las instrucciones de la vida; también se tuviera que privilegiar que parte a parte, pedazo a pedazo (analíticamente) se edificara la vida. Todo esto normado por el azar de los grandes números (en clara alusión que lo improbable no es imposible, si fuera así nosotros no estaríamos aquí dando cuenta de lo increíblemente excepcional de lo sucedido).

Pero desde los trabajos de Prigogine, se vienen replanteando ciertas interpretaciones que se derivan de las leyes de la termodinámica.

Es preciso primero mencionar las elaboraciones teóricas que nos llevaron a comprender que nuestro universo tuvo un origen hace más o menos dieciocho mil millones de años en el pasado, iniciándose a partir de la gran explosión (big bang) con la emergencia del espacio-tiempo, la energía total del universo y las leyes fundamentales que normarían los futuros eventos físicos.

Los sucesivos quiebres de simetría del campo unificado en los primeros instantes generaron los cuatro campos actuales: el gravitatorio, el fuerte, el débil y el electromagnético. Estos quiebres de simetría causaron la aparición de los primeros pares de partícula-antipartícula o materia-antimateria a partir de la energía.

Todo ello, acompañado de la comprensión de que nuestro universo es, en esencia, el único sistema aislado que existe, nos ha llevado a reconocer que toda la inmensa cantidad de sistemas que existen o pueden existir en el interior de nuestro universo, o son sistemas abiertos (pueden intercambiar materia y energía con su entorno), o son sistemas cerrados (pueden intercambiar energía con su entorno).

En todo caso, la entropía del universo (sistema aislado) es la suma algebraica de la entropía de un sistema particular más la suma de la entropía de su entorno (que es todo el universo menos, precisamente, el sistema mismo). Así, el sistema puede decrecer su entropía (aumentar su ordenamiento y complejidad) mientras que su entorno aumentarla, tal que la suma total sea un crecimiento neto de la entropía en claro acuerdo con la segunda ley.

Podemos apreciar que inmersos ahora en un contexto diferente, más amplio que el anterior, ciertos fenómenos considerados en el contexto anterior como poco probables o como no espontáneos, se pueden revisar bajo una renovada perspectiva.

No dejemos tampoco de lado lo que hace unos momentos comentábamos: que se vienen realizando reportes científicos que para cierto tipo de reacciones químicas, la noción de espontaneidad; esto es, sin aporte real de energía de los alrededores del sistema, los procesos de síntesis o generación de enlaces se producen en ambientes abiogénicos.

Pero volvamos al concepto "edge of chaos". Al encontrarse la vida razonablemente sostenida por las condiciones y procesos que puede producir nuestro universo,

la formación de una red auto-sostenible de la clausura catalítica es prácticamente inevitable. Pero esto ocurrirá siempre y cuando se hayan estado produciendo un conjunto de especies moleculares lo suficientemente diverso y lo suficientemente grandes.

El tamaño de los polímeros es importante pues la múltiple funcionalidad estará relacionada a lo que de estable pueda ser ese polímero. La diversidad de los polímeros viene de la mano con el hecho de que a suficiente diversidad, mayores probabilidades de emparentarse molecularmente en reacciones conectadas por algún proceso químico: hidrogenación, oxidación, compuesto intermediario, etc.

El aumento de las relaciones o, mejor dicho, de las interrelaciones entre los diversos polímeros generan un tipo de organización de los procesos químicos. La organización de la que hablamos, es aquella que dirige las reacciones entre los compuestos químicos de una determinada manera; tal que ahora, la conexión causal entre estos componentes se llega a estabilizar. Como dice Kauffman en la última cita que presenté, "las rutas de la vida son muchas" y esto es así pues no existe ninguna obligatoriedad de que los compuestos químicos se interrelacionen de una determinada manera en particular.

Es perfectamente posible que las rutas metabólicas hayan sido muchas, de ellas sólo unas cuantas pudieron acceder a la clausura catalítica. Posteriormente, un reducido conjunto de ellas lograron estabilizarse lo suficiente como para poder llegar a perpetuarse en el tiempo.

Lo que les sucedió a las que no lograron acceder a la clausura catalítica o, lográndolo, no les fue posible perpetuarse en el tiempo, tiene mucho que ver con una propiedad inherente a la vida: encontrarse en el "borde del abismo" (edge of chaos).

Por más estable que hasta hace unos momentos se pueda haber presentado una determinada especie biológica, nada le asegura que la próxima vez pueda sobrevivir. Tenemos el clásico ejemplo de los dinosaurios. Fueron un grupo de animales fascinantes (se postula que dieron origen a las aves) y vivieron en la tierra por alrededor de ciento sesenta millones de años. En poco tiempo, debido a un cambio notable del clima terrestre (ocasionado quizá por el impacto de un meteorito), se extinguieron hace más o menos cuarenta y cinco millones de años.

Los fenómenos de extinción de especies son algo normalmente esperado en el universo vivo y creo que resulta importante investigar sus causas más profundas para comprender lo que posiblemente le pueda pasar a la nuestra en algún momento en el futuro.

Pero lo que realmente me interesa en estos momentos, es relacionar estos hechos con lo que le pudo haber sucedido a las especies moleculares en el pasado remoto -antes que surgiera la vida-, tal que algunas de ellas se vieran encaminadas hacia su propia "extinción".

¿Evolución sin genoma?

El nombre de este sub-capítulo resulta casi una herejía para un modo de pensar el fenómeno biológico que se encuentra sumamente extendido entre los especialistas de todas las disciplinas formalmente emparentadas con las ciencias biomédicas actuales. Pues sí, Kauffman postula también que teniendo en cuenta su postura que privilegia a la propiedad catalítica sobre la propiedad replicativa, tenemos entonces también que empezar a re-pensar qué es lo que realmente significaría la herencia de la información.

Citemos a Kauffman sobre este respecto:

"El modelo anteriormente presentado para la emergencia espontánea de un conjunto colectivamente autocatalítico de moléculas orgánicas que pue-

den transformarse unas en otras y catalizar las transformaciones por cierta vía prescrita estadísticamente, es el primer miembro de una **nueva clase de universalidad**... Por consiguiente, merece la pena analizar los temas que surgen naturalmente de esta nueva clase de universalidad. La principal de tales cuestiones debe ser la capacidad de cualquier protoorganismo que se base en un "metabolismo" reproductivo para evolucionar en ausencia de una plantilla replicante de una secuencia arbitraria de ADN o ARN como el almacén de las propiedades de la herencia. ¿Puede tal evolución ocurrir? ¿Qué puede pasar? ¿Cuáles pueden ser los límites? [Kauffman, S. (1993); pp. 330]

Nuestro objeto aquí es brindar una argumentación lo suficientemente clara y rotunda sobre la completa posibilidad de aquello que Kauffman nos acaba de expresar: que la evolución biológica no tiene porque estar *necesariamente* vinculada a la existencia como almacén o receptáculo de la propiedad replicativa a los ácidos nucleicos.

Más aún, si de lo que hablamos es de los antecedentes y de los inicios mismos de la vida, Kauffman reclama en realidad que este re-pensar lo biológico en cuanto a lo que por propiedades se refiere se haga de un modo más radical. Esta radicalidad nos guiará hacia la averiguación de nuevas maneras de reconocer la universalidad de lo encontrado en la vida en el planeta tierra, tal que podamos dar inicio con la elaboración de una teoría de lo viviente con el carácter de universalidad que, por ejemplo, sustenta la física o la química.

Desde el momento en que empezamos a brindarnos la capacidad de poder acceder al mundo experimental partiendo de un esquema de trabajo que atribuye un mayor peso específico a una parte del comportamiento del fenómeno más que a la actualmente en boga, nos brindamos en ese preciso momento el camino hacia el inicio de poder reconocer ciertas regularidades que antes pasaban delante de nuestros ojos y no las reconocíamos como tales.

La cita anterior se encuentra después que Kauffman ha planteado una manera resumida o idealizada del modelo de la autoorganización autocatalítica. La mayor conclusión a la que llegará, es que de la química de los polímeros pueden emerger como propiedades colectivas tanto la homeostasis, como la autoreproducción.

En efecto, dado que un sistema autocatalítico de especies moleculares ha podido cristalizar. En otras palabras, se ha podido estabilizar el conjunto de reacciones moleculares que relacionan a una especie molecular con otras de manera directa o indirecta, las condiciones para su estabilidad en el tiempo dependerán en su mayor medida de la dinámica interna de tal sistema. Así, en los orígenes de la vida, la perpetuación de los protoorganismos o sistemas autocatalíticos **no necesitan** de la existencia de una molécula molde que les asegure, precisamente, esa perpetuación.

Es preciso en estos momentos realizar una introducción de los conceptos de "conjunto autocatalítico supracrítico y conjunto autocatalítico subcrítico" (*Supracritical Autocatalytic Set and Subcritical Autocatalytic Set*). Kauffman afirmará que la emergencia de la clausura catalítica se produce en una mezcla lo suficientemente compleja de un conjunto de polímeros catalíticos como una suerte de "fase de transición" que surgiría en un gráfico de los polímeros y las reacciones catalizadas entre ellos [Kauffman, S. (1993); pp. 312].

De la misma manera en que afirmamos lo que sucede con una mezcla suficientemente grande de enlaces de hidrógeno en un cúmulo de moléculas de agua en estado gaseoso: génesis de formas nubosas y sus efectos climáticos. De lo que sucede con una reunión lo suficientemente grande y compleja de neuronas: génesis de los fenómenos mentales y sus efectos sociales. Del mismo modo podemos también pensar en lo que sucede con una reunión lo suficientemente grande y compleja de especies moleculares catalíticas: génesis de la vida y sus efectos en la realidad.

En ninguno de estos tres casos se puede hablar que el fenómeno emergente sea debido a una propiedad que se encuentre de modo directriz en algún componente. Que esta propiedad sea inmanente a este componente y que haya por sí misma "causado" de modo predominante al fenómeno en cuestión (nubes y efectos climáticos; mente y fenómenos sociales; vida y procesos evolutivos).

Pero sostener que la vida surge como consecuencia de la pre-existencia de una molécula con capacidad autoduplicativa y el azar puro es, precisamente, una suerte de simplificación ultra-reduccionista que Kauffman no está dispuesto aceptar.

Tengo la impresión que a estas alturas de mi argumentación el lector podría, sino estar camino del convencimiento, por lo menos haberse planteado como posibilidad ciertamente de que Kauffman no está del todo descaminado.

En buena cuenta, parece razonable pensar que para ciertas zonas de la realidad lo múltiple, diverso y complejo es una condición de posibilidad para un estudio más fructífero en la búsqueda de una profundización del conocimiento, antes que lo único, uniforme y simple.

En este sentido, la apelación a los conjuntos autocatalíticos supracríticos como subcríticos nos indican que Kauffman es partícipe de la idea sobre la cual se edifica su propuesta teórica: la vida emerge en el universo de modo múltiple, diverso y complejo antes que de manera única, uniforme y simple. Pero ¿cómo definimos ambos conjuntos autocatalíticos?

Imaginemos un sistema de componentes moleculares (polímeros en este caso) y las reacciones por ellos catalizadas. Resulta extremadamente fácil llegar a la conclusión de que las reacciones catalizadas aumentan más rápidamente que el aumento de los polímeros. En breve, si construimos un gráfico de reacción (reacciones catalizadas en función de los polímeros) podremos observar que conforme se aumente la cantidad de polímeros dicho gráfico tendrá una pendiente positiva, de crecimiento.

En un sistema autocatalítico de polímeros podemos encontrar ante dos situaciones conforme los ciclos de reacción avancen en el tiempo. En primer lugar, existirá un sistema en que cada ciclo de reacción no involucra la aparición de una nueva especie de polímero; por tanto, la gráfica de reacción cesa de crecer y permanece constante, ello implica que el número de diferentes clases de polímeros en el sistema permanece finito. En segundo lugar, existirá un sistema en que por cada ciclo de reacción se produce una sucesiva adición de nuevas especies de polímeros; por tanto, la gráfica de reacción permanece en crecimiento y el número de distintas clases de polímeros es infinito. El primer caso corresponde al sistema autocatalítico subcrítico y el segundo corresponde al supracrítico.

Un sistema autocatalítico de polímeros contiene una variedad de polímeros que es producido por algún proceso de catálisis en el interior del sistema. Pero para que se produzca la catálisis en cuestión es imprescindible que exista un aporte de uno o varios de los reaccionantes por parte del exterior o medioambiente. La conexión entre el sistema y su exterior proviene del aporte de alguna variedad molecular que se encuentra en el exterior y que es asimilada por el sistema.

En buena cuenta, dicha variedad molecular del exterior se comporta como "*alimento*" para el sistema. En la medida que de parte del medioambiente exista el conjunto de variedades moleculares que necesita el sistema para que todas y cada una de las reacciones catalíticas ocurran, en esa misma medida el sistema autocatalítico ejecutará un nuevo ciclo de reacción. Cada nuevo ciclo de reacción puede visualizarse, de este modo, como la "*reproducción*" del sistema autocatalítico.

Una característica realmente sorprendente de los conjuntos autocatalíticos supracríticos es que ellos son capaces de *utilizar como alimentos* esencialmente casi cualquier especie molecular. Dado que ellos son o están camino a ser un conjunto virtualmente infinito, todo compuesto es asimilado como parte del sistema. Dicho compuesto formará parte de alguna reacción catalizada permitiendo que el conjunto autocatalítico se mantenga en el tiempo y aumentando o no el espacio de las posibilidades

frente al medioambiente. De especial importancia resulta la comprensión del comportamiento de los conjuntos autocatalíticos supracríticos frente a un medioambiente que por su naturaleza es siempre cambiante.

Supongamos que en un determinado momento el conjunto autocatalítico supracrítico se enfrenta a un medioambiente en que el insumo de los alimentos se ha variado. Dado que es una característica de este conjunto el asimilar cualquier especie molecular como alimento, el sistema supracrítico podrá metabolizar ese conjunto nuevo de especies moleculares. En otras palabras, haciendo uso de la terminología que proviene de la teoría de la evolución, cuando una entidad biológica se adecua a un medioambiente que ha cambiado decimos que se ha *adaptado* a ese medioambiente. En el nivel molecular, los cambios en el medioambiente se darán fundamentalmente cuando los insumos de especies moleculares varían.

Si una entidad tal como el conjunto autocatalítico supracrítico se adecua a ese medio cambiante, podremos afirmar de manera consistente que también se ha adaptado.

Referencias

- Bak P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*, Springer, Berlin.
- Costa, N. C. A. da, Doria, F. A. and Furtado do Amaral, A. F. (1993) 'Dynamical Systems Where Proving Chaos Is Equivalent to Proving Fermat's Conjecture', *International Journal of Theoretical Physics* **32**, 2187–2206.
- Fox, S.W.; Nakashima, T. (1980) The assembly and properties of protobiological structures: The beginnings of cellular peptide synthesis. *Biosystems* **12**:155.
- Fruton, J.S. (1982) Proteinase-catalyzed synthesis of peptide bonds. *Adv. Enzymol.* **53**:239.
- Kauffman, S. (1993) *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press. New York, Oxford.
- Kauffman, S. (2000) *Investigations*. Oxford University Press. New York, Oxford.
- Kuhn, T. (1962) *The Structure of Scientific Revolution*. Chicago: University of Chicago Press (1991, octava reimpression). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica).
- Lozano, J.A.; Galindo, J.D.; García-Borrón, J.C. (1997) *Bioquímica para ciencias de la salud*. McGraw-Hill-Interamericana de España.
- Orgel, L.E. (1987) Evolution of the genetic apparatus: A review. In *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*.
- Prigogine, I.; Stengers, I. (1984). *Order out of Chaos*, Bantam Books, New York.
- Scott, J.K.; Smith, G.P. (1990) Searching for peptide ligands with an epitome library. *Science* **249**:386.
- Silver, M.S.; James, S.L.T. (1981) Enzyme-catalyzed condensation reactions which initiate rapid peptide cleavage of substrates. 1: How the structure of an activating peptide determine its efficiency. *Biochemistry* **20**:3177.
- Tuerk, C.; Gold, L. (1990) Systematic evolution of ligands by exponential enrichment: RNA ligands to bacteriophage T4 DNA polymerase. *Science* **249**:505.