

Capítulo 2

Evolución biológica

La información, ese es el núcleo de la realidad. Los virus, los mensajeros de información biológica. La información, resultado de las complejísimas interacciones de miles de moléculas en la célula. El flujo de información entre las bacterias, la red de la vida...

Máximo Sandín

La capacidad computacional del universo explica uno de los grandes misterios de la naturaleza: cómo los organismos vivientes, que son sistemas complejos, han surgido de leyes fundamentales simples.

Estamos siendo testigos de un nuevo enfoque para la comprensión de lo que realmente es la información, tanto cuántica como biológica, que están inextricablemente unidas, como veremos. Esta propuesta se apoya en este punto de vista diferente con la idea de cubrir algunos de los huecos que han abierto en la ortodoxia las teorías emergentes, entre ellas la complejidad, y los recientes descubrimientos en las ciencias de la información cuántica y biológica.

Estudiosos del origen de la vida como Joao Oró, William Schopf, Stanley L. Miller y Antonio Lazcano entre otros, han investigado la síntesis de los elementos prebióticos en el medio interestelar.

Otros investigadores sostienen que las moléculas orgánicas complejas abundan en las zonas oscuras de las nubes interestelares. Hace más de 4 000 millones de años una nube interestelar colapsó en un disco giratorio que generó el Sol y los planetas. Algunas moléculas orgánicas complejas sobrevivieron al gran calor producido por la formación del sistema solar adhiriéndose juntas a cometas en los extremos helados del disco. Posteriormente

te, los cometas y otros remanentes de la nube trajeron las moléculas a la Tierra.

Como vimos en el capítulo anterior, podemos razonablemente decir que en esencia el universo es orgánico, plenamente preparado para que la vida emerja donde y cuando las condiciones lo permitan pero, ¿podemos especular un poco sobre cuándo y dónde podría aparecer la vida? Creemos que sí.

¿Cuándo? Más o menos a partir de las primeras formaciones de planetas, lapso que se puede extender desde los 9 000 millones de años después del Big Bang hasta la época actual.

¿Dónde? Existen en el universo cerca de 100 000 millones de galaxias. Cada galaxia, en promedio, contiene cerca de 100 000 millones de estrellas. El número de estrellas existentes es pues bastante grande: 10^{22} en el universo conocido.

Ciertos investigadores aventurados han tratado de estimar el número de planetas que podrían albergar vida. Uno de los primeros en hacerlo fue Frank Drake, de la Universidad de Cornell, y en su honor la ecuación que se emplea para hacer dicha estimación es llamada ecuación de Drake. Básicamente, el cálculo se hace como sigue: la ciencia ha determinado que en promedio las galaxias contienen cien mil millones de estrellas, el 10% (10^{10}) de las cuales tiene características similares al Sol. Luego se pregunta uno cuántas de estas estrellas tendrán planetas. Posteriormente estimamos en cuántos de estos sistemas planetarios pudo haber aparecido una forma de vida elemental. Así sucesivamente, se puede llegar a estimar cuántos casos de vida inteligente habría en la galaxia. El cálculo está lleno de incertidumbre. Los científicos optimistas, como Carl Sagan, acaban concluyendo que hay 10^6 (¡un millón!) de civilizaciones inteligentes sólo en nuestra galaxia. Los pesimistas, como Sebastián von Horner, concluyen que hay sólo una (nosotros). Basa tal estimación en una suposición que es relevante para la humanidad. Supone que, en efecto, se forman frecuentemente civilizaciones inteligentes, pero que con su desarrollo tecnológico acaban aniquilándose a sí mismas. Así, en un momento dado del tiempo sólo hay unas civilizaciones que duran muy poco y son reemplazadas por otras en otra estrella de la galaxia.

Nosotros nos alineamos con un interesante estudio (Dole, 1968) que llega a las siguientes conclusiones:

Tomando en cuenta la probabilidad de una estrella de tener planetas girando en órbita alrededor de ella, de que la inclinación del ecuador del planeta sea correcta para su distancia orbital, de que al menos un planeta gire en órbita dentro de una ecosfera, de que éste tenga una masa apropiada (0,4 a 2,35 veces la masa de la Tierra), de que la excentricidad orbital del planeta sea lo suficientemente baja, de que la presencia de una segunda estrella no haya convertido el planeta en inhabitable, de que el planeta sea de edad apropiada, de que todas las condiciones astronómicas sean propicias, se haya desarrollado la vida en el planeta, obteniéndose la abundancia de estrellas en la gama apropiada de masa (0,335 a 1,43); se puede estimar el número de planetas habitables en la galaxia.

En otras palabras, tomemos en cuenta el típico planeta habitable; alrededor de la misma masa de la Tierra, aunque más pequeño en promedio, con una luna similar en tamaño y distancia a la nuestra, con una atmósfera análoga, un ciclo similar de noche-día, un sol de magnitud y tamaño similares al nuestro, una suave inclinación de su ecuador y una moderada excentricidad de su órbita. Las estaciones deben ser parte de la experiencia común de sus habitantes, así como otros factores topográficos y climáticos: océanos, vientos, puestas de sol, arco iris, playas arenosas, cielo azul, noches estrelladas, desiertos, volcanes activos o durmientes, lluvias, ríos, nubes multiformes, montañas, relámpagos, y nieve y hielo en las regiones frías.

Los organismos vivientes de otros planetas deben tener una apariencia similar a los de la Tierra, ya que las leyes fundamentales funcionan en todo el universo. Es posible calcular, sin olvidar las exigencias ya citadas, el número aproximado de estrellas con planetas habitables. Según este estudio, un porcentaje reducido de las estrellas del universo puede alumbrar sobre planetas adecuados a la vida: el 0,47 %. Si tan sólo calculamos, como muestra, el resultado de nuestra Vía Láctea, se obtienen alrededor de 470 millones de planetas con características terráqueas. Por lo que si sabemos que en el universo hayal menos cien mil millones de galaxias, podrían existir alrededor de $4,7 \times 10^{19}$ planetas habitables. Sin embargo, este número nos parece muy exagerado. Teniendo en cuenta que los descubrimientos actuales exigen muchas más condiciones, como que el planeta se localice en la zona "mineralizada" de la galaxia, es decir, que su estrella pertenezca a la población tipo 1, que se encuentre lejos del centro de la galaxia, así como

una relativa cercanía a una supernova; que tenga un escudo protector como lo es Júpiter para la Tierra; que no se pueda invadir por una civilización el espacio de otra, etc., podemos reducir en un factor de cien mil la posibilidad de que existan planetas habitados. De cualquier manera, existen alrededor de 4 700 posibilidades en nuestra galaxia. Considerando 100000 millones de galaxias, pueden existir 470 billones de planetas habitables, un porcentaje muy pequeño, pero un número muy grande.

Este 0,0000047 % de sistemas solares que contienen planetas para soportar vida semejante a la de la Tierra son la excepción, pues actualmente ya se han detectado varios planetas cuya composición parece ser diferente a la de la Tierra. Sin embargo en un reciente artículo¹ se ve que la tendencia es a que haya planetas semejantes a la Tierra y pueden ser más comunes de lo que se esperaba.

La vida y su origen

La vida es pues un fenómeno cósmico, propiedad del universo, que una vez instalada posee la información para llevar a cabo "colonizaciones" permanentes, para diversificarse, adaptarse y modificarse según el medio ambiente, que es siempre cambiante.

Las pistas cruciales para resolver el misterio del origen de la vida deben aparecer en el mapa cósmico de nuestro propio inicio, ya que este incluye, como vimos en la primera parte, el origen de la Tierra dentro de la familia de planetas solares, el origen de las estrellas que proveen la energía necesaria para la vida, el origen de las estructuras dentro del universo y el origen y evolución del universo mismo (de Grasse Tyson y Goldsmith, 2004). La vida debe estar sujeta a leyes, por lo que al estudiar su origen debemos tomar en cuenta lo inorgánico, su evolución y sus leyes.

Dado que la información, tanto para construir la materia como para construir el conocimiento, es el fundamento del universo, el origen de la vida debe buscarse en el *quantum* y en el espacio. El modelo de evolución

¹ Para estar al corriente de los nuevos descubrimientos en este tema, consultar la web <http://www.astroseti.org>

que presentamos, como ya se dijo, considera que las leyes de la física y las que de ellas se derivan operan en todo el universo.

De acuerdo con el Dr. Máximo Sandín²

No creo que tenga el mismo significado que la vida sea un fenómeno único surgido en la Tierra o que sea un fenómeno inherente al universo y que se mueva, una vez formada, a través de él.

Supongo que se puede argumentar que si la vida responde a leyes físicas es susceptible de repetirse cuantas veces sea necesario, pero tengo la impresión de que un fenómeno de tal complejidad y de tal necesidad de energía tuvo que estar asociado a los mismos orígenes del Universo o, al menos, a la formación de sistemas estelares. Los datos apuntan a que los virus y las bacterias aparecieron en la Tierra cuando todavía estaba formándose y crearon las condiciones para la vida en la Tierra.

Richard Fortey (1999) afirma:

El hecho de que cuerpos extraterrestres estén involucrados en el origen de la vida es correcto. Algunas de las síntesis de moléculas de carbono esenciales para la vida pueden haber sucedido en el crisol de la creación al principio del universo. Existe material polvoso orgánico en el espacio interestelar. Hemos descubierto que la relación de cometas y meteoritos con el destino de la Tierra no cesa una vez que las células vivas se han establecido; de tiempo en tiempo, ellos intervienen dramáticamente en la narrativa del planeta. Como los astronautas han observado, con toda la fuerza de una verdad obvia acuñada por primera vez, somos solamente un pequeño planeta suspendido en la vastedad de un espacio indiferente, pero no vacío. Nuestro destino está ligado con el de las estrellas, cometas, meteoritos, todos empapados en un baño de radiación, alguna de la cual se originó en la aurora del tiempo mismo.

En principio la vida puede originarse en una gran cantidad de ambientes físicos. El origen de la vida, como una línea de investigación científica, permanece menos desarrollada que la génesis de los planetas, las estrellas y

² Comunicación personal.

las galaxias. Carentes de una teoría rigurosa, nuestra consideración del desarrollo biológico y la evolución debe colocarse en una base similar al de nuestras discusiones sobre el universo físico, ya que la vida emergió de acuerdo con sus leyes fundamentales. El problema principal es que los científicos no toman en cuenta los principios constructivos del universo.

Por consiguiente, la génesis astronómica establece el escenario para el eventual advenimiento de la Biología (Adams, 2002). En términos de la Ingeniería, podemos afirmar que la Física y la Astronomía estudian las estructuras que sirven de cimentación para que el edificio de la vida pueda construirse.

- La vida surge en las estructuras planetarias que poseen las propiedades necesarias para sustentada:
- La evolución cosmológica apoya la creación de estrellas y galaxias necesarias como agentes del proceso.
- Las estrellas son las plantas de energía que manejan el desarrollo de la vida hacia una creciente complejidad.

Las estrellas masivas producen todos los núcleos más pesados que el He, incluyendo el C y el O necesarios para la construcción de la biota conocida.

A través de la evolución cosmológica, las leyes de la Física en última instancia construyen las diminutas estructuras químicas y los vastos paisajes celestiales necesarios para que la vida emerja, se desarrolle y florezca.

La información biológica

La información biológica está relacionada con la información cuántica. Es decir, las leyes que gobiernan la información biológica evolucionan a partir de la información cuántica, los sistemas biológicos se rigen por la información de las leyes emergentes y también por las leyes de la Información Cuántica, Existe una propiedad de las partículas elementales, que posiblemente se prolongue hasta los átomos, llamada *entanglement* (entrelazamiento), cuyo postulado teórico es el llamado efecto EPR (de Einstein-Podolsky-Rossen), mediante el cual un efecto inducido localmente en una partícula elemental es reproducido "instantáneamente" en otra partícula con

la que previamente había formado un par en estado de *entanglement* y que posteriormente se separan espacialmente. Debido al *entanglement*, las partículas permanecen indefectiblemente relacionadas entre sí, si han sido generadas en un mismo proceso.

En palabras más simples, la información del cambio en una partícula "viaja" y modifica a la otra de forma instantánea.

La analogía del *entanglement* con la energía ayuda a entender procesos tales como las reacciones químicas o la operación de una máquina. De la misma forma se puede analizar el flujo de *entanglement* de un subsistema a otro requerido para llevar a cabo un proceso cuántico de información. Una aplicación muy importante, la corrección de error cuántico, nos da la mejor evidencia para precisar la ciencia de la Información Cuántica en un marco teórico útil, que nos permita estudiar otras áreas.

La computación y la comunicación clásicas han desarrollado un entendido de códigos para corregir errores en contra de interferencias. Un ejemplo simple es la repetición del código. Este esquema representa al *bit* cero como una cadena de tres *bits* 000 y al *bit* 1 como una cadena de tres *bits* 111. Si la interferencia es relativamente débil, algunas veces puede sustituir uno de los *bits* de un triplete, cambiando, por ejemplo, 000 a 010, pero la sustitución de dos *bits* en un triplete será mucho menos frecuente. Siempre que se encuentre 010 (ó 100 ó 001) podemos tener la seguridad de que el valor correcto es 000 ó 0. Generalizaciones más complejas de esta idea proveen excelentes códigos para corregir errores y así proteger la información clásica.

En cuanto a la corrección de los errores cuánticos, aunque la Mecánica cuántica prohíbe conocer con certeza el estado cuántico de un objeto, ideas desarrolladas por Peter W. Shor, del MIT, Y Andrew M. Steane, de la Universidad de Oxford, en 1995, demostraron que se pueden corregir los errores cuánticos sin conocer los estados de los *qubits*. Esto lleva a la conclusión: de la corrección de errores cuánticos se deriva la corrección de errores clásicos.

Los procesos de la naturaleza son fractales, ya que se repiten en cualquier escala de complejidad. Si observamos a vuelo de pájaro el código de la vida nos damos cuenta de que las instrucciones genéricas para la manufactura de proteínas se escriben en "palabras" de tres le-

tras llamados *codones*, cada uno de los cuales especifica uno de los 20 aminoácidos o la señal "alto a la traducción." El arreglo de estos codones y su significado de aminoácido fue alguna vez considerado aleatorio. Pero descubrimientos recientes indican que la información, como mensajes de las leyes ha mantenido este orden.

Las simulaciones de computadora revelan por qué: comparado con alternativas hipotéticas, el código estándar es excepcionalmente bueno para minimizar el daño causado por errores en los genes mismos o en el proceso de traducir genes en proteínas (Freeland y Hurst, 2004).

En este artículo de Freeland se señala que la combinación de tres letras, donde la tercera puede cambiar, produce el mismo aminoácido: por ejemplo CUU, CUC, CUA, CUG, codifican el mismo aminoácido, leucina. Si se compara el código para corrección de errores de la Física Cuántica se puede observar que es similar al arreglo de codones que la naturaleza ha utilizado durante millones de años.

A nivel de moléculas más complejas, como las enzimas:

Cada una "sabe", es decir, posee la información para catalizar un tipo de reacción. Se ha demostrado que las enzimas y las moléculas sobre las cuales actúan se comunican mediante el intercambio de información en una especie de "lenguaje molecular". La enzima recibe e integra simultáneamente muchas informaciones; modula su actividad y responde de manera flexible a las modificaciones del ambiente. Así, las enzimas son capaces de memorizar información y modificar mecánicamente su estructura en función de la información recibida y restituir la información modificada (de Rosnay, 1993).

Sobre el origen de la vida

No fue el azar, sino las leyes de la naturaleza las que manejaron el origen de la vida. La casualidad no tiene oportunidad alguna.

Manfred Eigen

Para tener una hipótesis sobre el origen de la vida se debe partir de una definición de la vida. Desgraciadamente no existe una definición universalmente aceptada y la que utiliza la NASA es, por decir lo menos, ridícula. Basados en autores como De Grasse Tyson, Donald Goldsmith, Nelson y Cox y en la *Teoría Integración de Sistemas Complejos* de Máximo Sandin, que veremos más adelante, se propone la siguiente definición de vida como herramienta de trabajo:

La vida es el proceso en el que estructuras disipativas (Agudelo y Alcalá, 2005), que emergen a partir de la integración de sistemas complejos, son capaces de extraer energía de compuestos orgánicos para producir biomoléculas más complejas y ampliamente ordenadas con base en elementos menos complejos. La vida existe en aquellas cosas que se reproducen y evolucionan, al adquirir y almacenar, procesar y transmitir información, para incrementar su complejidad y nunca están en equilibrio con su medio ambiente.

La vida debe estar inmersa en un proceso evolutivo de acumulación e intercambio de información, considerando que los procesos de adaptación son sólo parte de ese proceso evolutivo. Aspectos que no han sido tomados en cuenta para entender y enriquecer nuestro conocimiento sobre el origen de la vida son, entre otros:

- No se le asigna la importancia debida a los enlaces o pegamentos que determinan la unidad de sistemas vivos. *Ciertos enlaces o pegamentos en y entre los sistemas complejos (como agua, ADN, ARN, proteínas, etc.) de los sistemas vivos podrían darnos la clave de la vida.*
- Ciertos átomos de estos enlaces son diferentes a los de la materia inorgánica. Nuestra principal propuesta es que, muy probablemente, en su constitución intervienen átomos diferentes, átomos que en vez de electrones están formados con *muones*.

Por lo tanto, se propone que la información necesaria para que los sistemas vivos adquieran sus propiedades debe provenir de los elementos (enlaces) que estimulan su interacción. En este caso, por lo expresado a continuación, probablemente sea el muón el elemento clave que otorgue la

información necesaria para que el sistema complejo que es la célula adquiere sus propiedades características.

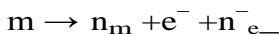
Así, podemos decir que la vida es un nuevo estado de la materia (Nicolis y Prigogine, 1977), para un nuevo estado del universo. El paso de un umbral que provoca un aumento sustancial en la complejidad de la información contenida en la energía oscura, lo que a su vez provoca la aceleración de la expansión del universo. A primera vista estas afirmaciones parecerán aventuradas, pero se infieren de las teorías punta de la física cuántica, como la supersimetría o las supercuerdas (Agudelo y Alcalá, 2005).

Aquí surge un cuestionamiento: ¿por qué se piensa que estos sistemas vivos primigenios se integran con muones?

Para nosotros, en la naturaleza nada existe en forma gratuita. El verdadero desafío para la física de partículas es saber cuál es la función de todas y cada una de las partículas descubiertas y por descubrirse en los procesos macro en los que intervienen. Basados en la ciencia nueva de la Información cuántica, afirmamos que toda materia y energía forman siempre sistemas indisolubles con la información, de manera que a mayor complejidad de la información es más compleja la estructura que la contiene ya que es mayor el número de elementos diferentes interactuantes contenidos en un sistema de materia-energía.

El muón es una partícula elemental más pesada pero más inestable que el electrón y tiene una vida media mucho más corta que éste. Esto significa que está más alejado del equilibrio, por lo que los enlaces que forma permiten más grados de libertad a los elementos del sistema, característica indispensable para un organismo vivo. Al ser más frágil el muón que el electrón, cuando decae es posible que permita, en ciertas circunstancias, que las ramas de la doble hélice del ADN se separen, ya que al decaer libera energía de movimiento.

Se podría objetar que los muones tienen una vida media muy corta de $2,19703 \times 10^{-6}$ seg. Pero en el caso que tratamos, pudieron estabilizarse por un periodo más prolongado al formar un sistema de *entanglement* con el agua y átomos de carbono. Por supuesto que el detectados es difícil ya que, como toda partícula subatómica, el simple hecho de medida la perturba y en el caso del muón provoca que decaiga:



Como se aprecia en esta fórmula, el muón decae en un neutrino muónico más un electrón más un neutrino electrónico.³ Sin embargo, el principio de la conservación de la energía no se cumple, ya que debe tomarse en cuenta la energía de movimiento que se libera. El muón tiene una masa-energía 206,7683 veces la masa del electrón por lo que la información que contiene es mucho mayor a la del electrón y consecuentemente lo es su complejidad. Esto justificaría el incremento de la capacidad de las moléculas biológicas para auto-ordenarse respecto de las simplemente orgánicas. Además, el muón puede tener un gran *entanglement*, lo que justificaría sus propiedades de transmisión de información.

Creemos que en los sistemas con vida los estados de *entanglement* muy probablemente están constituidos por núcleos de C (carbono), H (hidrógeno) y O (oxígeno). Los átomos de H y O, cuando están integrados en determinados arreglos, dan lugar al "agua biológica" al sustituir el electrón por el muón. Este sistema a su vez formaría sistemas más complejos al interactuar con átomos de C y produciría las propiedades específicas de las moléculas de ADN y ARN, debido no sólo a la información que el muón contiene, sino a su probable decaimiento. En ciertos pegamentos, la separación de las ramas de la doble hélice le proporcionan la necesaria energía de movimiento. Las partículas resultantes, de acuerdo con la Física cuántica, pueden ser cualquier *leptón* más su correspondiente antineutrino, $e^+ + \nu_e$, $e^- + \bar{\nu}_e$ o cualquier *quark* con su *antiquark*, pero siempre existe la diferencia en masa que es energía de movimiento.

Después de más de treinta años de experimentos ortodoxos, la naturaleza del neutrino sigue siendo extremadamente elusiva. No se ha logrado mucho progreso y se sigue tratando con el mismo problema. Por lo tanto, es necesaria no sólo una nueva idea, sino una "nueva física" más allá del modelo estándar".⁴

"La célula" es la respuesta generalmente aceptada a la pregunta: ¿cuál es el sistema primigenio de la vida? Entre muchos otros, en ella se encuentran como subsistemas fundamentales el ADN, el ARN, el agua, ciertas proteí-

³ http://particleadventure.org/particleadventure/spanish/lepton_charts.html

⁴ http://autodynamics.org/html/muon_decay.html

nas y un elemento pocas veces considerado, los virus, que transportan información intercelular y del ambiente a la célula.

Máximo Sandín señala: «La vida es un sistema "irreductiblemente complejo": o están todos sus componentes o no hay vida, es decir, que apareciera donde apareciera (tal vez nada más al aparecer la materia en el Universo) tuvo que ser de repente.

»La información no "fluye" del ADN (como se creía). Es el resultado de la interacción de los tres tipos de moléculas (ADN, ARN Y proteínas). Si no actúan las tres no hay información. El ARN y las proteínas no son "intermediarios" ni "controladores", sino parte del proceso. Una misma secuencia de ADN significa cosas muy distintas en diferentes organismos o en distintas circunstancias».

En pocas palabras, la vida es un conjunto de propiedades de un sistema que surge de la integración de varios sistemas complejos, los cuales separadamente no poseen dichas propiedades.

Como se aprecia en los siguientes párrafos de un reciente informe, los últimos descubrimientos nos indican que las bacterias son el fundamento de la vida y la cooperación la base de su evolución:

El estudio de las colonias de bacterias (grupos de bacterias que crecen de una sola o de algunas células similares) es un paso fundamental hacia el entendimiento del *biofilm*, que está compuesto por varias colonias diferentes de bacterias.

Inicia el artículo con la comprensión de que:

Bajo condiciones de crecimiento natural, las bacterias pueden auto organizarse en colonias jerárquicamente estructuradas de 10^9 - 10^{12} bacterias cada una. Para este fin, desarrollan y utilizan una gran variedad de agentes de comunicación bioquímicos, tales como moléculas simples, polímeros, péptidos, proteínas complejas, material genérico y hasta "casetes de información genérica" como plasmados y virus.

Patrones complejos de colonias emergen a través de un intercambio único de comunicación entre los individuos (a nivel micro) y entre colonias (a nivel macro). Cada bacteria es, por sí misma, un sistema biótico autónomo con su propio material gelatinoso que posee capa-

tidades informáticas (guarda, procesa e interpreta la información). Esto concede a la célula cierta libertad para seleccionar las respuestas a los mensajes recibidos como mensajes bioquímicos, incluyendo la auto-alteración, y diseminar ampliamente los mensajes para iniciar alteraciones en otras bacterias. Tal auto-plasticidad y capacidades de tomar decisiones eleva el nivel de cooperación bacteriana durante la autoorganización de las colonias.

A medida que los individuos incrementan su adaptación al grupo, incrementan su durabilidad y su adaptación al ambiente, incrementando su complejidad. Estas esenciales asignaciones de instrucciones, aprendidas por las bacterias, dan como consecuencia una mayor complejidad que provee el grado de plasticidad y flexibilidad requerido para una mayor durabilidad y mejor adaptabilidad de toda la colonia a un ambiente dinámico.

De acuerdo con este marco, nuevas características colectivas emergen durante la auto-organización en cada nivel, desde el material celular gelatinoso interno hasta la colonia entera. La célula entonces obtiene nuevas características y habilidades co-generadas que no están explícitamente guardadas en la información genética de los individuos. Por ejemplo, las bacterias no pueden guardar genéricamente toda la información requerida para crear los patrones de la colonia. En el nuevo marco no necesitan capacidades informáticas y de auto-plasticidad, puesto que la información requerida está generada de manera cooperativa a medida que la autoorganización se adquiere por comunicación entre las bacterias. Por lo tanto, la bacteria sólo necesita guardar genéticamente las guías para producir esas capacidades y usadas para generar la nueva información como se requiera. Las observaciones demuestran que las bacterias usan su flexibilidad intracelular, que involucran redes de señales para la transmisión de energía y plasticidad genómica, para mantener colectivamente seguras y compartidas las interpretaciones de signos químicos, intercambio de mensajes químicos de significados de comportamiento y comunicación. La comunicación basada en significado permite la formación de comportamiento intencional de las bacterias, alteración intencional de la estructura de la colonia y la decisión de toma de características que debemos asociar con una inteligencia social de las

bacterias. Tal inteligencia social, si existe, requiere ir más allá de la comunicación para incluir procesos intracelulares adicionales aún desconocidos, para generar memoria de la colonia heredable y frecuentemente compartir circunstancias genómicas (Jacobet et al., 2010).

Los virus

Sin embargo, la célula aislada no es la vida. Por compleja que sea la organización de la célula, por inagotablemente variadas que sean las especializaciones que ha alcanzado como bacteria, ¿no se parecen entre sí más como moléculas que como animales? Actualmente podemos agregar lo siguiente: para consideradas como el primer sistema viviente, necesita de los elementos de todo sistema complejo que "quedan fuera del sistema" y que evolucionan paralelamente a estas formas. En el caso de este primer sistema viviente, estos elementos son los virus. Ellos pueden estar en la célula o en su exterior y llevan a ésta la información de su medio ambiente; son los portadores de información intercelular y extracelular. Enfrentados a la célula aislada, nuestra mente duda en buscar sus analogías entre lo inorgánico y lo orgánico. Pero es necesario pensar en ellas como información en *otro estado de la materia* desde niveles tan profundos como lo cuántico. Un nuevo tipo de materia, mucho más complejo, para un nuevo estado del universo.

Como dijimos, no se puede separar la célula de los virus, *descifrar su origen separadamente, parece ser un trabajo inaccesible y como son tan antiguos como la vida, sus altas tasas de evolución han borrado cualquier registro útil de su linaje o edad, por lo que su edad sólo puede ser inferida.* Los virus han influenciado la evolución de la vida desde la perspectiva de su persistente y decisiva información.

Toda vida ha sido tocada por la influencia viral y la mayoría de los genomas muestran la duradera evidencia de las huellas virales. Estas huellas se presentan en los genomas virales que han persistido y continúan dejando nuevas huellas en los genomas, como nuestro propio ADN puede atestiguar. Las formas primitivas de plantas y animales se iniciaron en los océanos. Desde la perspectiva de los virus los

océanos representan un hábitat muy adecuado, ya que el medio acuático conduce a los virus a todos los huéspedes cercanos, evita la desecación y la necesidad explícita de usar vectores (Villareal, 2005).

Los virus son información, microcomputadoras complejas que captan, transportan y transmiten información. El ser humano, en su ignorancia, supone que son agentes que "infectan" y trata de matarlos. Pero los virus, al no ser entidades vivas, no mueren.

Los virus inactivos pueden hacer virus. Es común en los laboratorios la práctica de desactivar o como dicen los científicos, desinfectar los virus mediante rayos ultravioletas. Sorprendentemente, tales virus "muertos" pueden algunas veces reactivarse (Villareal, 2005).

Expondremos brevemente algunas de las propiedades de los principales constituyentes de la célula.

Agua. *Tiene una estructura extremadamente flexible y dinámica; esto podría explicar algunas de sus propiedades.* Para la Dra. wan Ho (2004) no existe nada más simple que la molécula del agua, cuya estructura común es muy diversa y cambiante. Se conocen alrededor de 13 estructuras de hielo cristalinas a diferentes temperaturas y presiones. Como líquido, el agua forma grupos o redes de moléculas unidas con enlaces que vibran o no en forma aleatoria. La base de toda esta complejidad yace en la habilidad que una molécula de agua tiene para unirse con sus vecinas a través de un tipo especial de enlace, el enlace de hidrógeno.

Un enlace químico bien conocido es el enlace de hidrógeno. Para entender cómo se produce el enlace de hidrógeno, imagínese la molécula del agua que consiste en un átomo de oxígeno ligado con dos átomos de hidrógeno. La molécula del agua tiene una forma aproximada de tetraedro, triángulo de tres dimensiones con cuatro esquinas. El átomo de oxígeno se encuentra en el corazón del tetraedro, en tanto que los dos átomos de hidrógeno apuntan hacia dos de las cuatro esquinas y "dos nubes de electrones", pertenecientes al átomo del oxígeno, apuntan hacia las dos restantes esquinas del tetraedro. Las "dos nubes de electrones" tienen carga negativa y son

resultado de las estructuras atómicas del oxígeno y del hidrógeno y de la forma cómo se combinan en la molécula del agua.

El núcleo del oxígeno tiene más carga positiva que el del hidrógeno, así que los electrones que comparten son atraídos ligeramente más hacia el núcleo del oxígeno que al del hidrógeno, lo que ocasiona que la molécula del agua se polarice, con dos "nubes de electrones" de carga negativa en los polos opuestos a los dos átomos de hidrógeno, cada uno de los cuales se queda con una ligera carga positiva (No obstante, cálculos mecánico cuánticos han mostrado que las dos nubes de electrones no están realmente separadas entre sí).

Por lo tanto, la carga positiva de hidrógeno de una molécula de agua puede atraer el oxígeno de carga negativa de una molécula de agua vecina para formar un enlace (una liga) de hidrógeno (enlace H) entre ellas. Cada molécula de agua puede potencialmente formar cuatro ligas de H. Dos en que aporta sus átomos de hidrógeno a los átomos de oxígeno de otras dos moléculas de agua, y dos en la cual su átomo de oxígeno acepta un átomo de hidrógeno de cada una de las otras dos moléculas de agua. En otras palabras, cada molécula es capaz de actuar como "donador" y "receptor" de hidrógeno para las otras dos moléculas de agua, así que se tienen cuatro vecinos ligados o una *coordinación-4*.

Es cierto que el agua normal puede ser producida en el laboratorio con la simple unión de dos átomos de H y uno de O. Sin embargo, inclusive esto requiere de energía electromagnética que les de la información que les permita interactuar y adquirir sus propiedades específicas como molécula de agua común. ¿No cabría pensar que en el caso del agua biológica, es el *muón* el que produce la energía electromagnética que permite sus condiciones especiales?

Ninguna molécula tiene el potencial de pegamento de hidrógeno que posee el agua, pero algunas moléculas presentes en una solución acuosa perturban o rompen este pegamento.

Existen grandes diferencias entre pegamentos químicos y biológicos. En el contexto de la estructura de las proteínas, el término "estabilidad" puede definirse como la tendencia a mantener una conformación original. Las proteínas originales sólo son marginalmente estables. Una cadena dada de polipéptidos asume incontables conformaciones diferentes, y como resultado del estado desdoblado de una proteína, se caracteriza por un alto grado

de entropía conformacional. Esta entropía y las interacciones del enlace de hidrógeno de muchos grupos en la cadena de los polipéptidos con solventes (agua) tienden a mantener el estado desdoblado. Las interacciones químicas contraatacan estos efectos y estabilizan la conformación original que incluyen enlaces de disulfatos y sus interacciones débiles, enlaces de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas e iónicas. Una apreciación del papel de estas interacciones débiles es especialmente interesante para entender cómo las cadenas de polipéptidos se doblan en estructuras secundarias y terciarias y se combinan con otras proteínas para formar estructuras cuaternarias. (Nelson y Cox, 2000)

Tal como los pegamentos de hidrógeno, los enlaces de disulfatos y sus interacciones débiles y las interacciones hidrofóbicas e iónicas juegan un papel muy importante en las moléculas orgánicas, informando a sus elementos cómo comportarse, doblándose, desdoblándose y formando cadenas. Los pegamentos biológicos dan a las células la información necesaria para que sus componentes trabajen organizadamente. Esta información es mucho más compleja que la que proporcionan los enlaces de las moléculas orgánicas. Como se propuso anteriormente, sostenemos que los *muones* toman el lugar de los electrones en los enlaces biológicos.

Es aceptado por la comunidad científica que el primer organismo viviente fue la célula y nosotros proponemos que las propiedades del enlace del agua biológica contienen la información necesaria para producir la vida. Su mecanismo de envolvimiento debe contener no sólo las moléculas fundamentales sino también permitir la interacción de su información (sistema de *entanglement*).

ADN. Sin entrar en consideraciones de cómo se llevan a cabo los procesos de replicación y transcripción, hacemos notar una propiedad importante de la estructura del ADN conocida como "super-enredamiento" (enredamiento de lo ya enredado). La transcripción del ADN y el super-enredamiento requieren una separación de las ramas del ADN, proceso difícil en una molécula con sus ramas helicoidales entremezcladas.

Estas propiedades de los organismos biológicos deben buscarse en los enlaces basados en los muones. El ADN "vive" mientras está inmerso en un medio acuoso. De otra manera es un ADN inerte.

La adhesión de las dos hebras de ácido nucleico se debe al *enlace de hidrógeno*, en el que suponemos intervienen los muones, de fácil decaimien-

to. Los enlaces de hidrógeno son uniones más débiles que los típicos enlaces químicos, tales como interacciones hidrófobas, enlaces de Van der Waals, etc. Esto significa que las dos hebras de la hélice pueden separarse con relativa facilidad, quedando intactas en sus componentes. La fortaleza relativa de la unión entre las dos hebras del ADN reside en la suma de gran cantidad de enlaces de hidrógeno a lo largo de las dos hebras paralelas. Se forman dos enlaces de hidrógeno por cada unión A-T y tres por cada unión C-G.

Máximo Sandín explica:

Desde el punto de vista morfológico, las técnicas de micro- filmación han permitido la observación del ADN nuclear de células vivas en tiempo real: Gasser y sus colegas han mostrado la molécula girando como un danzarín demoníaco. Para Gasser la imagen icónica del ADN como una doble hélice estática es algo pasado. [...] La molécula se creía formando íntimas relaciones con proteínas que le ayudaban a empaquetarse y a disparar y reprimir la actividad de los genes. Hasta recientemente, esas relaciones se creían fundamentalmente fijas o cambiantes sólo ligeramente con el tiempo. Pero la idea ha colapsado. [...] Los vídeos resultantes han expuesto un inesperado barullo en la actividad de proteínas pululando alrededor del ADN. «Esto ha cambiado la forma en que pensábamos sobre el núcleo» dice Tom Misteli del Instituto Nacional del Cáncer en Bethesda (Sandín, 2005).

El permitir tales grados de libertad probablemente se deba a que los muones constantemente decaen y se restablecen. Este proceso no está estudiado en la Física Cuántica, por eso nuestra insistencia en que la Biología debe apoyarse en todas las ramas de la Física.

ARN. Experimentos iniciales en el laboratorio de Jack Szostak y Gerald Joyce, en la Harvard Medical School y The Scripps Research Institute, respectivamente, han mostrado cómo la información que poseen las moléculas de ARN se ha tornado más compleja al interactuar éstas con el medio. Los experimentos comienzan con millones de hebras de ARN generadas aleatoriamente en el laboratorio. Estos experimentos han mostrado una débil habilidad para catalizar una reacción específica, pero una vez que se

han replicado repetidamente en condiciones que introducen cambios en las replications, producen ribosomas funcionalmente más eficientes.

Estos experimentos muestran que son posibles muchos tipos de catálisis de ARN; el ARN justamente proporciona el tipo de molécula que "sabe un poco de todo", lo cual es necesario para que la biología siga adelante. Estos experimentos también sugieren que la información genera orden del desorden y amplifica la función bioquímica débil. Si estos investigadores y sus colegas están en el camino correcto, la evolución no es solamente el sello distintivo de la biología, sino un prerrequisito para la vida. (Knoll, 2003)

Existe una dificultad: los nucleótidos (elementos del núcleo celular) son moléculas que pueden ser levóginas o dextróginas y el ARN puede ser construido a partir de cualquiera de ellas. Pero las cadenas de moléculas mezcladas no crecen. Entonces, ¿cómo pudo emerger el ARN que consiste sólo de moléculas dextróginas de una mezcla 50-50? Este problema ha llevado a muchos investigadores a la idea de que el ARN es la molécula primordial de la vida. Nosotros creemos que en este experimento, como en tantos otros, la ausencia de los muones evita la formación de sistemas con vida. Pero en la Tierra primitiva, donde la atmósfera era diferente, los rayos cósmicos accedían con gran cantidad de muones que en algún momento interactuaron con el agua de la sopa primigenia, produciendo el agua biológica.

Una línea de investigación

Resumiendo, es muy probable que las leyes de la Física obliguen a que la vida surja cuando proporcionan a ciertos sistemas la información necesaria para que se "auto-organicen", al integrar como enlaces de estos sistemas al muón.

De hecho, la pregunta "¿Qué es la vida?", ha sido efectivamente removida del pensamiento establecido en Biología. Para la Biología Molecular, que se enfoca exclusivamente en investigar los "bloques de construcción" de la naturaleza, se han perdido de vista las diferencias características entre lo viviente y la materia inerte. Para la Biología Molecular no hay diferencia cualitativa entre una célula viva y una muerta. Justo antes y después de morir la célula contiene las mismas moléculas y estructuras (Lillge, 2001).

Pero esto sólo es aparente ya que existe una enorme diferencia, la desaparición de los principales pegamentos o enlaces que caracterizan su estado de vida. Es decir, la gran diferencia es que el flujo de información se ha detenido. Lo que caracteriza la vida es el flujo continuo de la información que transmiten los enlaces.

El científico Fritjof Capra⁵ expresa lo anterior de la siguiente manera:

He sostenido que la clave para una teoría comprensiva sobre los sistemas vivientes descansa en la síntesis de dos diferentes puntos de vista, el estudio de la sustancia (o estructura) y el estudio de la forma (o patrón). En el estudio de la estructura medimos y pesamos las cosas. Sin embargo, los patrones no pueden ser medidos ni pesados; deben de ser representados. Para entender un patrón, debemos representar la configuración de las relaciones (intercambio de información). En otras palabras, la estructura involucra cantidades, mientras que el patrón involucra calidades [Capra, 1997].

En los últimos 30 años se ha abierto una nueva línea de investigación científica sobre aspectos clave siempre ignorados por los métodos estándar de la Biología Molecular y la Genética. Esta línea nos ofrece introspecciones fascinantes del estado interno de las células vivas, lo que ha permitido descubrir que las células tienen un tipo específico de comunicación con base en señales electromagnéticas extremadamente débiles, aunque de alta efectividad biológica.

Es importante estudiar la naturaleza de las señales electrónicas o biofotones, como también se les llama, pero sobre todo estudiar los logros fenomenales de los que los procesos vivos son capaces. Así, en el tejido vivo se puede observar que cada célula produce algunos millones de moléculas por segundo, lo cual es mucho más en magnitudes de lo que un laboratorio puede producir.

Varios biofísicos han señalado las condiciones que deben cumplirse para que este complejo proceso ocurra de una manera controlada. Debe darse un

⁵ Fritjof Capra es doctor en Física Teórica por la Universidad de Viena y ha realizado investigaciones sobre la física de alta energía en varias universidades europeas y americanas. Ha escrito y dado conferencias sobre las implicaciones filosóficas de la ciencia moderna y es autor de varios libros entre los que destaca *El Tao de la Física*.

acoplamiento íntimo en la comunicación de célula a célula, la cual, de acuerdo con sus estimaciones, se da solamente cuando los procesos clave de control ocurren a la velocidad de la luz. Los estados de *entanglement* pueden dar la respuesta.

Cualquier medio de transmisión de información, incluidos mensajeros químicos y biomoléculas y otros más, no es suficiente, ya que serían demasiado lentos para garantizar la integridad del organismo. De este simple cálculo, se deduce que la luz u otra acción electromagnética (¿muones?) que operan a la velocidad de la luz deben de estar involucradas en alguna forma en la organización de los procesos vivos.

La primera investigación sistemática del papel de la luz en los procesos vivos fue llevada a cabo en 1920 por el científico ruso Alexander Gurwitsch, un contemporáneo de Vernadsky; estableció como hipótesis conclusiva que toda célula viva emite luz, aunque a un nivel muy débil.

Ninguno de los elementos constitutivos de la célula *per se* puede considerarse vivo, incluyendo los virus. En todo sistema complejo, existen elementos que quedan fuera del sistema, en la célula estos elementos son los virus, agentes indispensables para que los sistemas vivos interactúen (intercambien información) a nivel celular y con su medio ambiente.

Evolución de la vida

Vamos a dejar de lado totalmente la actual teoría neo-darwinista de la evolución, ya que, de acuerdo con varios biólogos y filósofos de la ciencia,

aunque Darwin estaba en lo correcto acerca de la realidad de la evolución [estudiada desde hacía un siglo en las universidades europeas], su teoría está fundamentalmente equivocada y sus errores han sido multiplicados por el neodarwinismo (Reid, 2007).

En este ensayo trataremos la relación de la evolución biológica, que forma parte de la evolución del planeta como un todo, con la *Teoría de la Información* ya que consideramos que, al igual que en la evolución de la materia inerte, son leyes de la naturaleza derivadas de las leyes fundamentales de la física las que guían el proceso evolutivo de la materia viva.

Howard Bloom afirma:

La Teoría de la Información contrasta radicalmente con el seleccionismo individual que domina el actual neo-darwinismo, que sostiene que los animales y los humanos están manejados por la voracidad de los genes. Unos genes suficientemente rapaces y egoístas para creer que muchas copias de sí mismos, pasadas a la siguiente generación, pueden expandir el árbol familiar rápidamente [los que creen esto son quienes apoyan la teoría, no los genes] [...] Los individuos sacrifican su legado genérico a los intereses de una mayor colectividad [Bloom, 2003).

Una gran cooperación hubo de ser necesaria desde hace mucho tiempo para lograr formar el complejo ecosistema del que formamos parte.

Solomon H. Snyder, investigador de la Universidad Johns Hopkins, declara, refiriéndose a la información, que una de las principales interrogantes en la Biología es precisamente cómo discretas porciones del cuerpo llegan a ser lo que son y adoptan su apariencia y función característica ... ¿Qué le indica a un grupo de células en un embrión que se desarrollen en un brazo? ¿Por qué cierto grupo de células se desarrollan en un hígado, otro grupo en glándulas y otro en gónadas? El cerebro es un órgano que exhibe de muchas maneras una gran complejidad, mayor que el resto del cuerpo. En su estado embrionario, miles de senderos neuronales serpentean frecuentemente en enrevesados itinerarios antes de alcanzar sus localizaciones adultas.

La hipótesis aceptada en la Biología, de que el funcionamiento de cualquier ser viviente puede ser explicado en términos del ADN y del metabolismo celular, sólo logra ser un paliativo para una profunda explicación del fenómeno, pues surgen los interrogantes de cómo se establecieron el código genético del ADN y el metabolismo celular. Las respuestas a las anteriores preguntas se aclaran en gran medida al considerar a la información (mensajes de las leyes) como la energía directriz de todos los procesos y la capacidad computacional de la materia.

En cuanto a la evolución biológica, se han propuesto teorías desde principios del siglo XIX, y si somos rigoristas podríamos considerar que el primer evolucionista fue Heráclito, Pero no es el tema de este trabajo, por lo que nos apoyaremos en la teoría de Máximo Sandín que brevemente exponemos:

Un nuevo modelo evolutivo

El modelo evolutivo que propone Sandín (1997) se podría sintetizar de la siguiente forma:

el origen y evolución de la vida es un proceso de integración de sistemas complejos que se autoorganizan en otros sistemas de nivel mayor. Las unidades básicas serían las bacterias, que cuentan con todos los procesos y mecanismos fundamentales de la vida celular, cuyos componentes parecen haberse conservado con muy pocos cambios a lo largo del proceso evolutivo. Los virus, mediante su mecanismo de integración cromosómica, serían los que, bien individualmente, bien mediante combinaciones entre ellos, introducirían las nuevas secuencias responsables del control embrionario de la aparición de nuevos tejidos y órganos, así como de la regulación de su funcionamiento.

La capacidad de respuesta de bacterias y virus a estímulos ambientales justificaría los inevitablemente rápidos y amplios cambios que muestra el registro fósil, obligados por la compleja interrelación de unos tejidos con otros y con el total del organismo. Y su carácter "infectivo" haría posibles estos cambios simultáneamente en un considerable número de individuos. Por otra parte, este carácter infectivo podría estar implicado en las extinciones masivas y selectivas, muchas coincidentes con períodos de disturbios ambientales, las cuales serían parte del mecanismo del proceso evolutivo.

En este contexto, la selección natural, cuyo nulo poder creativo ya se ha argumentado, quedaría relegada a un papel no sólo secundario en el proceso evolutivo, sino ocasional y vacío de contenido como mecanismo de evolución. La competencia no sería la fuerza impulsora de la evolución, ya que las nuevas especies surgirían y madurarían en conjunto. Y el azar, ya sea biológico o estadístico, quedaría aún más en entredicho por el determinismo, el contenido teleológico que implica la existencia de unos "componentes de la vida", cualquiera que sea su origen, es decir, tanto si han surgido en la Tierra como consecuencia de una "propiedad emergente" de la materia, como si éste o

cualquier otro fenómeno implica que existan y se propaguen por el Universo.

Pero este nuevo modelo no sólo conduce a una nueva visión de la naturaleza de los procesos biológicos. La relegación al lugar que le corresponde de los viejos conceptos, de hondas raíces culturales, implica la aparición de nuevos conceptos, nuevos valores que modelan la forma de ver la realidad; en definitiva: un nuevo Paradigma.

Este modelo evolutivo de Sandín se fortalece cada día más con los descubrimientos recientes en la Genética y la Biología Molecular.

La historia científica tiene profundos efectos en las teorías de la evolución. En los inicios del siglo XXI, la biología molecular celular ha revelado una densa estructura de redes de procesos de información que el genoma usa como una memoria de lectura-escritura en vez de ser sólo un mapa del organismo. La secuenciación del genoma ha documentado la importancia de los elementos móviles en las actividades del ADN y en los grandes eventos de reestructuración del genoma en los eventos claves de unión en la evolución [...] Las funciones naturales de ingeniería que median la reestructuración del genoma son activadas por múltiples estímulos (información), en particular por eventos similares a los encontrados en los registros del ADN: información microbiana e hibridación interespecífica [...] Estos descubrimientos genéricos, más la consideración de cómo los arreglos del ADN móvil incrementan la eficiencia de la generación de novedades genómicas, es lo que hace posible formular una visión de los procesos interactivos evolutivos. Esta visión integra el conocimiento contemporáneo de las bases moleculares de los cambios genéricos, los eventos mayores en la evolución y la información que activa la reestructuración del ADN, con el entendimiento citogenético clásico acerca del papel de la hibridación en la diversificación de las especies (Shapiro, 2010).

Considerando la información con mayor amplitud, podríamos agregar que la especiación está determinada en última instancia por las leyes de la Física. La Tierra en su conjunto es un sistema complejo, en su dinámica intervienen directamente las leyes de la Física. Debido a los movimientos

de la Tierra se producen los desplazamientos de las placas tectónicas que a su vez producen la unión y separación de continentes e islas, el surgimiento de volcanes, cordilleras, cambios climáticos, etc. Es decir, el ambiente cambia continuamente, lo que a su vez produce los estímulos en los sistemas vivos que responden adaptándose a los nuevos ambientes, produciéndose la especiación. Estos cambios en el ambiente pueden ser de varias magnitudes de acuerdo con las leyes de poder que rigen los eventos que los producen.

Desgraciadamente no es posible estudiar a fondo la evolución desde una perspectiva sistémica completa, pues el número y la complejidad de los procesos hacen esta tarea, con las herramientas de estudio actuales, prácticamente imposible. Por lo tanto, en nuestro intento de rastrear la evolución del universo, debemos restringirnos a estudiar la evolución de la vida sólo en nuestro planeta y, en esta segunda parte, sólo desde su aparición hasta el surgimiento del *Homo*.

De cualquier manera, como lo que pretendemos es esquematizar la evolución de la información, nuestro marco debe ser lo más global posible, por lo que para nosotros la evolución biológica es la evolución de los ecosistemas.

Los ecosistemas presentan fenómenos y procesos aparentemente disímiles en disciplinas muy diversas, aunque se puede decir que los mecanismos que rigen el desarrollo de estos sistemas poseen profundas similitudes (fractalidad). Los sistemas complejos biológicos (ecosistemas) sufren las transformaciones propias de los sistemas abiertos. La evolución de tales sistemas no se realiza a través de procesos que se modifican de manera gradual y continua, sino que se dan por sucesiones de desequilibrios y reorganizaciones. Cada reestructuración del sistema conduce a un período de *equilibrio dinámico* relativo (*stasis*), durante el cual el sistema mantiene las estructuras previas con fluctuaciones dentro de ciertos límites. Este tipo de evolución ha sido objeto de numerosos estudios experimentales y teóricos en sistemas físicos, químicos y biológicos que condujeron a la *Teoría de la Autoorganización de Sistemas Abiertos*, liderada por Ilya Prigogine (García, 2000). Es decir, la evolución de los ecosistemas es paralela a la evolución de los sistemas biológicos que la integran, aunque se puede observar que los incrementos de complejidad en general no son proporcionales.

En la búsqueda de leyes generales para la organización eco lógica, derivadas de las leyes físicas, el primer paso debe darse en la Termodinámica y la Física Cuántica. Puesto que los sistemas deben satisfacer las leyes de la termodinámica, muchos de los patrones observados en las biotas complejas son consecuencia de tales leyes. La información, contenida en la energía que la transporta, es el elemento común a todos los procesos, fluye, se guarda, se procesa y se transmite. Basados en los primeros desarrollos de la *Teoría General de Sistemas* (von Bertalanffy, 2001), los diagramas de flujo de información proveen una descripción global (holista) de los ecosistemas donde todos los elementos se consideran, incluyendo, obviamente, el ambiente (Solé y Bascompte, 2006).

Para describir adecuadamente el comportamiento de los ecosistemas debemos primero conocer un poco sobre el comportamiento de los elementos que los constituyen, que en este caso son los sistemas complejos vivos. Es necesario conocer su *organización*: la disposición de sus elementos componentes (la parte más espacial-estática-estructural) y las interacciones o relaciones que se establecen entre ellos (la parte más temporal-dinámica-funcional) (Moriello, 2005).

Todo sistema está situado dentro de un cierto entorno, ambiente o contexto que lo circunda, lo rodea o lo envuelve total y absolutamente. El medio ambiente se considera hoy en día como un ámbito o campo en donde se desarrolla el sistema, el cual se modela continuamente a través de las acciones que aquel efectúa (Varela et al., 1997). En consecuencia, tanto el sistema como su entorno se encuentran en un estado de constante flujo de información, de *diálogo*, en donde se modifican y reconstruyen alternativa y continuamente al interactuar entre sí, acoplándose de forma mutua y recíproca (Moriello, 2005).

Los sistemas complejos biológicos son *abiertos*, ya que intercambian materia-energía e información con su ambiente, de forma selectiva, lo cual determina su viabilidad dentro de éste. También es intrínsecamente *dinámico*, dado que su organización no es rígida sino que mantiene una armonía flexible con su ambiente a lo largo del tiempo.

Asimismo, un sistema biológico es *no-lineal*, debido a que su comportamiento es habitualmente impredecible: una pequeña causa puede producir un efecto violento y dramático o una enorme causa puede producir un efecto mínimo. Además, es *complejo* dado que está compuesto por una gran

cantidad de elementos, cada uno de los cuales interacciona con sus vecinos relativamente inmediatos y es muy difícil determinar lo que ocurrirá más allá de un cierto horizonte temporal (Moriello, 2005).

En general un sistema complejo vivo es *adaptativo*, ya que no sólo es influido por el medio ambiente sino que reacciona y se adapta, en menor o mayor medida, a él. Pero la capacidad para adaptarse tiene límites: si el sistema no puede acomodarse a la *tensión* (estrés),⁶ modificando su estructura o su función, puede transformarse o deteriorarse de manera parcial o total, temporal o permanente. Esta capacidad depende tanto de la organización interna como del intercambio de información con su entorno (Moriello, 2005).

Otra característica importante de los sistemas biológicos es la jerarquización. La vida se va organizando en niveles jerárquicos de acuerdo con su complejidad; por lo tanto, a la cantidad de información que deben recibir procesar y transmitir. El nivel más bajo está constituido por lo cuántico, después por las reacciones químicas.

Por encima de este nivel está el de las enzimas, que catalizan (aceleran miles de veces) y gobiernan las reacciones de la química orgánica; luego viene el nivel celular y así, sucesivamente, se va llegando a los niveles endocrino, hipotalámico, al de los centros nerviosos superiores y, por ahí arriba, aparece lo mental. Cada nivel se rige por sus propias leyes, obedece a su propio conjunto de restricciones. Una molécula de glucosa en la célula no puede hacer cualquier cosa, pues además de cumplir las leyes de la química, deberá obedecer las que le imponen las enzimas (por ejemplo, la hexoquinasa). Pero estas enzimas tampoco hacen cualquiera de las cosas que pudieran hacerse en un tubo de ensayo, porque están acotadas por la arquitectura celular que, en su funcionamiento, hace entrar o salir del citoplasma a iones y moléculas que facilitan o inhiben sus funciones. La entrada de

⁶ El húngaro Hans Selye concibió la idea del Síndrome de Adaptación General (SAG), que describió en la revista inglesa *Nature*, en 1936. El SAG, también conocido como Síndrome del Estrés, es lo que Selye señaló como el proceso bajo el cual el cuerpo confronta un "agente nocivo". Este proceso consiste en tres etapas, primero una "señal de alarma" donde el cuerpo se prepara para la "defensa o la huida"; segundo, una resistencia del organismo; y tercero, si la duración del estrés es prolongada, el cuerpo entra en una etapa de agotamiento, una forma de envejecimiento debida al deterioro del organismo por el desgaste sufrido durante la resistencia.

estos iones y moléculas está a su vez controlada por las restricciones que les imponen los niveles superiores (por ejemplo, el páncreas y la suprarrenal, que tienen hormonas para controlar la glucemia). Cada nivel está entonces acotado no sólo por sus propias restricciones sino también por todas las de los niveles que tiene por encima. Como corolario, un nivel biológico está tanto o más acotado cuanto mayor sea el número de niveles jerárquicos que tiene por encima. Finalmente, a la glucosa le quedan en el organismo unos pocos caminos metabólicos de los que no se puede apartar, porque hay toda una maraña de controles (restricciones) superiores que obligan a que los cumpla estrictamente. Si bien parece irrefutable que con la aparición evolutiva de nuevos niveles superiores, más complejos en tanto confieren facultades más avanzadas, los niveles que ya existían fueron siendo cada vez más y más restringidos, esto no debe tomarse de ninguna manera como si el funcionamiento actual de un sistema biológico fuera fatalmente lineal y jerárquico. Que en un ejército haya una estratificación jerárquica, no quita que un general pueda impartir un orden directa a un soldado, ni que su chofer pueda transmitirle a él un mensaje importante. Análogamente, un descenso de glucemia puede provocarle un terrible choque al cerebro, y un aumento en la tasa de hormonas sexuales puede cambiarle no ya su función, sino el tamaño y preponderancia de ciertos núcleos fundamentales. La fisiología moderna tiende a demostrar que el procesamiento de la información neural se lleva a cabo en una complicadísima red de componentes en paralelo, y que no parece existir un "comando superior autoritario" cuyo papel consista en tomar decisiones jerárquicamente. [De hecho, los sistemas son más complejos en cuanto adquieren más elementos constitutivos y aumentan las interacciones entre ellos. La función de la jerarquización es el control de los procesos J. Los niveles más bajos son los más arcaicos y, por el hecho de tener más restricciones, son los menos ambiguos. Por lo contrario, los superiores tienen mayor libertad: son más flexibles y tienen un ámbito mayor para la creatividad. [Pero es importante damos cuenta de que, mientras más bajo el nivel, más imprescindible es el sistema].

A primera vista se diría que si se agrega un nuevo conjunto de restricciones, lejos de facilitar o de enriquecer los procesos, éstos serán interferidos o se llegaría a bloqueados del todo. Pero no es así. Volvamos a recurrir a un ejemplo: si plantamos una parra y no le ponemos ninguna restricción, su grado de libertad será tan grande que le sería imposible llegar a cubrir la pérgola a dos metros del suelo; pero sí en cambio la sujetamos a una vara y le restringimos ciertos grados de libertad, seguramente la llegará a cubrir.

Para que se posibiliten y enriquezcan los procesos, las restricciones impuestas por cada nivel jerárquico deben tener sentido. Este sentido es, justamente, el que tratan de descubrir los especialistas de la dinámica de cada nivel: las leyes de los procesos. "Sentido" en el caso de un río, son las restricciones especificadas por las leyes de la hidrodinámica, que rigen su fluir y el impacto que produce en el paisaje. Y en un ejemplo de ingeniería, introduciendo una planta hidroeléctrica, el funcionamiento de las turbinas; de la electricidad, que rigen el de la planta generadora; de la electrónica, que rigen la marcha de todos los equipos eléctricos enchufados a las líneas de electricidad, etc. Esas leyes forman conjuntos de restricciones coherentes. En lo biológico, las restricciones están explicadas por las disciplinas que rigen cada nivel: la química, la enzimología, la biología celular, la endocrinología, la neurobiología, la ecología, etcétera (Blanck-Cerejeido y Cerejeido, 1992).

Para mantenerse estables y funcionando, los sistemas complejos biológicos tienen la capacidad de procesar la información interna y externa mediante tres mecanismos principales:

1. La *homeostasis*, es el conjunto de *procesos fisiológicos que mantienen los estados estables en el organismo* [Canon, 1929]. O sea, que la homeostasis proporciona el nivel ideal de equilibrio interno de los sistemas vivos, en el que las variables fisiológicas deben mantenerse dentro de rangos estrictos para la vida.
2. La *alostasis*. Los seres vivos se encuentran frente a cambios ambientales durante todo el tiempo de su funcionamiento. En ocasiones los cambios son predecibles y en otras impredecibles, pudiendo ser tam-

bién momentáneos o perdurables. Para poderse adaptar a estos diferentes momentos sin que se rompa el delicado equilibrio del sistema y se salga de sus rangos vitales, se necesitan respuestas dinámicas capaces de reaccionar ante tales estímulos. A esta capacidad se le denomina *alostasis*. Por esto, al acuñar el término Steding y Eyer (1988) la definieron como *la forma de mantener la estabilidad necesaria a lo largo del cambio*.

3. La *homeorresis*, término creado por Waddington, se refiere a la estabilización de curso hacia el cual se mueve todo sistema complejo biológico al adaptarse a los diferentes estímulos del medio. Es decir, son procesos del organismo que le permiten mantenerse dentro de un curso establecido a pesar de los cambios que deba hacer por alteraciones del medio en que se desarrolla; es la capacidad de regresar a una trayectoria compatible con la vida a pesar de la presencia de distintos estados fisiológicos (Goldstein, 2002; y John C. Wingfield, 2003).

Los términos antes definidos tratan sobre un mismo tema: el equilibrio en los sistemas vivos. Y aunque en algunas cosas suenan muy similares, más que eso, son complementarios, ya que para poder lograr la homeostasis, o el equilibrio estable del sistema, se deben llevar a cabo una serie de procesos dinámicos en respuesta a las diferentes situaciones que este necesita afrontar, ya sea por influencias internas o externas. Y la capacidad de realizar continuamente estos cambios se debe a la *alostasis*, que permite establecer niveles de equilibrio para cada situación en particular. Por otro lado, la *homeorresis* se asegura que los cambios *alostáticos* que se lleven a cabo mantengan el desarrollo del sistema dentro de ciertos límites dinámicos, que no se alejen del curso necesario para la vida. Con esto se puede ver que pensar en la homeostasis como un evento estático es simplista, ya que para que ésta funcione debe ir acompañada de continuos cambios y reajustes que se dan gracias a la *alostasis* y *homeorresis*, procesos eminentemente dinámicos.

Los ecosistemas, entonces, se pueden considerar a su vez como sistemas complejos vivos y con un comportamiento similar al de sus componentes, aunque con un nivel de complejidad mucho mayor.

La descripción detallada de un eco sistema es una meta imposible: cada especie por sí misma involucra demasiadas variables que tratar, pero a ciertos niveles de descripción, los modelos estadísticos de comunidades de multiespecies son capaces de explicar su complejidad eco lógica y sus cambios a través del tiempo (Solé y Bascompte, 2006).

Podemos afirmar que la evolución biológica es la evolución del planeta, que mediante cambios en el tiempo adquiere en su totalidad mayor complejidad y, por lo tanto, mayor capacidad de procesar información. En este proceso evolutivo tienen gran importancia los eventos catastróficos. A través de la historia de la vida, los cambios ambientales y los cambios evolutivos resultantes, en ocasiones específicas han sido tan extremos que han causado extinciones masivas de sistemas biológicos (organismos y ecosistemas). Estos eventos catastróficos están regidos por leyes de poder (ver glosario) y los eventos extremos se dan en lapsos de tiempo muy grandes. Sin embargo, si a la biosfera se le da el tiempo necesario, puede recuperarse y adquirir mayor complejidad cuando se introducen nuevas formas de vida, que aparecen cuando ciertos sistemas complejos vivos se integran mediante la información que transporta la enorme cantidad de energía que se libera. El otro factor de suma importancia es la interacción de los sistemas complejos vivos con los campos de información que, también a través del tiempo y paralelamente con las estructuras materiales, se han ido complejificando. Así, se llegó a adquirir la gran complejidad que tuvo la biosfera en la época previa a la aparición del mal llamado *Homo sapiens*.