

# LA DECOHERENCIA CUÁNTICA Y LA FORMULACIÓN DE UNA NOCIÓN DE INFORMACIÓN APLICABLE A LA BIOLOGÍA

## QUANTUM DECOHERENCE AND THE FORMULATION OF A NOTION OF INFORMATION APPLICABLE TO BIOLOGY

**Eugenio Andrade**

Departamento de Humanidades Universidad del Bosque, Bogotá, Colombia.

(Recibido: 03/2019. Aceptado: 06/2019)

### Resumen

Discutiré la noción de información que puede inferirse a partir de la teoría de la decoherencia cuántica de Zurek. Mostraré tres aspectos distintivos que la contrastan con la teoría de la información de Shannon. (1) La fuente de información reside en el potencial inherente a los sistemas cuánticos. (2) En lugar de recepción de información, se trata de una actualización de información de acuerdo a la definición previa de los estados realmente accesibles por el medio ambiente. (3) En lugar de canal de transmisión de información, se destaca el papel del medio ambiente como selector de estados preferidos (posibles y altamente probables) a ser actualizados, y además como depósito de información inaccesible (estados posibles pero altamente improbables). Se propone clarificar estas ideas, buscando su aplicabilidad para el entendimiento de los sistemas vivos por analogía con sistemas cuánticos. La supervivencia de la información seleccionada explica la coordinación y propagación de variantes epigenéticas responsables de la diferenciación celular en el contexto de un acople estructural recíproco y funcional entre la célula y el medio ambiente. De esta manera se discute un paralelismo entre algoritmos típicamente darwiniano y otro neolamarquiano.

**Palabras clave:** Decoherencia, selección medio ambiental, información, estados preferidos, sistemas macroscópicos semejantes a los cuánticos.

### **Abstract**

I will discuss the notion of information that can be inferred from Zurek's theory of quantum decoherence. I will show three distinctive traits in contrast with the standard Shannon information theory, i.e. (1) the information source as a potential inherent to quantum systems. (2) Instead of reception of information, an actualization prior definition of really attainable states by the environment. (3) Instead of information transmission channel, the role of the environment as a selector of preferred states (possible and highly probable) to be actualized, and as a reservoir of unaccessible information (possible but highly improbable). It is proposed a clarification of these ideas, aiming at their applications for the understanding of living systems as quantum-like. The survival of selected information will account for the coordination and propagation of epigenetic variants that are responsible for cell differentiation in the context of cell and environment reciprocal functional and structural coupling. In this manner a parallel between Darwinian and (Neo)-Lamarckian algorithm is discussed.

**Keywords:** Decoherence, environmental selection, selection, information, preferred states, quantum-like systems.

### **Introducción**

En las últimas décadas se ha manifestado un rechazo a la aplicación de la teoría de Shannon en biología, la cual explica la transmisión de información a partir de una fuente (núcleo celular sede del ADN), a un receptor (citoplasma celular y ribosomas donde tiene lugar la síntesis de proteínas), mediante un canal de transmisión (el ARN mensajero que va del núcleo al citoplasma). Dicho esquema unidireccional en la transmisión de información del ADN a las proteínas se conoce como el dogma central de la biología molecular, un modelo importado de la ingeniería que entonces buscaba optimizar la transmisión de mensajes. La información se

estima de acuerdo a Shannon en bits, o el número de elecciones binarias que disminuyen la incertidumbre de un receptor de información, sobre los posibles mensajes que pueden emitirse de una fuente, independientemente del significado y el valor de uso de la información transmitida. En consecuencia, los seguidores de Shannon se dedicaron a hacer cálculos de probabilidades basados en frecuencias estadísticas de secuencias de ADN, los cuales resultaron incapaces de distinguir entre una secuencia de ADN que codifica para una enzima funcional, de otra que codifica para una enzima no funcional, ni tampoco de otra que no codifica proteína alguna. No obstante, se registran avances importantes en la búsqueda de una noción de información al interior de la biología. La escuela biosemiótica de Hoffmeyer y Emmeche (1991) [19], distinguen entre información digital y analógica, que a nivel molecular corresponde a la información en el ADN y las proteínas, respectivamente. La información analógica, se manifiesta en interacciones dadas por afinidades estereoquímicas y reconocimientos de patrones estructurales, necesarios para la actividad enzimática incluidos procesos de expresión de la información digital almacenada en el ADN. Además, dichos reconocimientos son el fundamento de las afinidades entre enzimas y sus correspondientes sustratos y por tanto de los procesos metabólicos que sustentan transacciones energéticas necesarias para mantener a los sistemas vivos lejos del equilibrio térmico, dando lugar a la auto-organización [1]. Por esta razón autores como Gunter Wächterhäuser (1990)[36], Harold Morowitz (1992)[28] entre otros, sostienen que la información metabólica es anterior a la información genética, tesis conocida como la del metabolismo primero. La información genética sería un resultado seleccionado en la evolución, por cuanto facilita la producción de proteínas catalíticamente activas en un mundo en que como afirma Kauffman existía “vida sin genoma”. Por otra parte, la teoría de sistemas en desarrollo, formulada por Susan Oyama (2000)[29], Paul Griffiths y Russell Gray (1994) [17] entre otros, rechaza la tesis del carácter informacional atribuido exclusivamente a los genes. Proponen la ontogenia como el proceso en el que la forma aparece a lo largo del desarrollo debido a una multiplicidad de factores genéticos, epigenéticos,

hormonales, nutricionales, medio ambientales, conductuales, etc. Se trata de una diversidad de factores formativos internos y externos que participan en la ontogenia del individuo biológico. Esta aproximación, recupera el sentido etimológico del término “in-formación”, o sea la auto-imposición o la generación de la forma en la materia, en el transcurso de la ontogenia. En los últimos años se ha venido mostrando que esta tesis da sustento a la noción de información inspirada en la teoría de los signos de Charles Sanders Peirce (Andrade 2009)[2]. De acuerdo a esta visión, los seres vivos no interpretan como tal códigos digitales como el genético, sino señales de muy diversa índole. En las últimas décadas, se ha descrito una inmensa cantidad de moléculas que actúan como señales químicas necesarias para explicar procesos de crecimiento y diferenciación celular. Además, diversos autores siguiendo las propuestas de J. von Uexküll (1940)[34] han mostrado como los animales interpretan señales del entorno para ajustar su estructura y definir comportamientos, orientados a metas específicas necesarias para la supervivencia. La información se entiende como proceso de generación y modificación de las formas vivas, mediante la interpretación de fluctuación físicas y químicas del medio ambiente, interno y externo, en un contexto específico dado por la interacción con otros organismos. Interpretación de señales que induce en los organismos la adopción de ajustes en su estructura interna y la definición de acciones y conductas que se proyectan hacia su medio exterior. En este artículo propongo mostrar que este nuevo intento de reelaborar la noción de información a partir de problemas propios de la biología, encuentra un referente interesante en los estudios sobre la decoherencia cuántica, permitiendo el establecimiento de un campo fecundo de interacción entre la biología y la mecánica cuántica.

## **1. La información según la decoherencia cuántica**

Una de las ideas que distingue la noción de información inherente a la decoherencia cuántica (DC) con la propuesta de Shannon tiene que ver con que la primera asume la creación y transmisión de la información como un proceso espontáneo desde una fuente en estado cuántico (Qubits), a estados clásicos (Bits) seleccionados

por el medio ambiente, mientras que para Shannon se trata de una transferencia de información desde una fuente clásica, hacia un receptor clásico u observador cuya ignorancia sobre los estados de la fuente se mide en términos de bits de información. Para aclarar estos aspectos contrastantes planteo la siguiente discusión sobre la fuente, la recepción y la transmisión de la información.

### La fuente de información

De acuerdo a Bohr los sistemas cuánticos no pueden ser entendidos como objetos preexistentes definibles por propiedades reales, sino que las propiedades que les asignamos son relativas a un experimento determinado. El estado cuántico inicial constituye una potencialidad con respecto a la actualización subsiguiente de un subconjunto dado de propiedades mediante la medición (Auletta 2005)[5]. Un estado es potencial si y solo si funciona como condición necesaria pero no suficiente para actualizar ciertas propiedades con una probabilidad mayor de cero. La condición suficiente depende de la medición y por tanto está fuera de control por dicho sistema. De acuerdo a Wheeler (1990)[37] los sistemas cuánticos consisten esencialmente de información. El vector de estado de un sistema cuántico se describe en términos de dos estados exclusivos que pueden ser combinados linealmente, por ejemplo  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ , de modo que cada combinación puede representarse como un punto en la superficie de una esfera de radio unitario. Es decir, los sistemas cuánticos podrían ser entendidos como fuente de un código binario inagotable para efectos de computación cuántica (Auletta 2005)[5]. En principio son infinitos los estados potenciales virtualmente existentes, pero de acuerdo a la tesis de la decoherencia solo son realmente accesibles los estados en superposición o los llamados estados preferidos, que constituyen el fundamento de la percepción del mundo como clásico. Un sistema dado no actualiza al mismo tiempo distintos estados en superposición o potencialmente informativos, de modo análogo en biología a nivel individual una célula toti-potente puede tomar una vía de desarrollo u otra dependiendo del contexto bioquímico tisular, aunque en otras condiciones la célula podría adoptar otro estado o incluso revertir a una conformación anterior. Así mismo a

nivel poblacional, unas subpoblaciones podrían actualizar un estado y otras otro, dependiendo de las condiciones medio ambientales.

Por el contrario, para Shannon la fuente de información sería cualquier estructura clásica describible como un arreglo específico, de entre un número muy grande de permutaciones que podrían estimarse a partir de los mismos constituyentes básicos. En este caso, la información se refiere a la ignorancia del observador con respecto a todos los mensajes posibles dados por permutación de los mismos. El bit corresponde a la opción binaria que reduce a la mitad la incertidumbre de un sistema receptor sobre la fuente. El potencial informativo aumenta con la complejidad de la fuente, aunque sería menor que el potencial infinito asociado de la fuente cuántica.

#### La transferencia o mejor la actualización de la información

Mientras que Shannon habla de transferencia de información, la decoherencia cuántica se refiere a generación o actualización de formas clásicas a partir de un potencial cuántico. Es así como los colapsos bruscos de la función de onda provocados por la medición efectuada por un observador tipo Copenhague, serían casos muy específicos y muy poco frecuentes que podrían ser ignorados, mientras que pequeñas transiciones discontinuas entre estados, provocadas por choques aleatorios con fotones presentes en el entorno, serían mucho más frecuentes y constituyen por tanto el foco de atención de los estudios sobre la decoherencia. No obstante, esta tesis da cabida a la idea de que, entre estas dos situaciones extremas, por un lado, la observación humana muy poco frecuente y por el otro, el bombardeo permanente de fotones, existen sistemas cuánticos procesadores de información denominados, sistemas colectores y usuarios de información (IGUS) (Zurek 1989a, 1989b)[39][40]. Dichos sistemas interactúan entre ellos, modificándose a sí mismos y al entorno. Son interacciones que tienen lugar mediante la detección de perturbaciones físicas (principalmente por fotones, electrones, partículas, campos electro-magnéticos, pero también por sustancias químicas, etc.) del entorno, emitidas por otros sistemas, las cuales son asumidas como señales informativas que los guían en la

adopción de restricciones estructurales y en la definición de las acciones implementadas hacia el medio externo. En consecuencia, a cada sistema en transición de lo cuántico a lo clásico, corresponde una subregión del medio ambiente, definida para cada uno de ellos de acuerdo a las relaciones que sostiene con otras entidades.

La transferencia de información de estados cuánticos a clásicos, remite a un problema análogo a la medición cuántica. Se ha postulado que las bacterias actúan como agentes que miden la localización de los protones en las enzimas, utilizando como aparato de medida los correspondientes sustratos metabólicos (McFadden 2000)[27], (Conrad 2001)[13]. Es así, como el *Escherichia coli* se vale de la lactosa para ejecutar mediciones cuánticas sobre la posición de sus protones activado así la enzima  $\beta$ -galactosidasa. En el caso de bacterias en condiciones de inanición, la mayoría de los protones estarían en superposición, pero en presencia de fuentes de energía, las moléculas de sustrato actúan como dispositivo de medición cuántica, y fuerzan a las partículas a tomar los valores reales propios del mundo clásico. Las bacterias ejecutan mediciones cuánticas que miden sus estados internos, e influyen de esta manera su dinámica, escapando del determinismo (Igamberdiev 2008)[21] y comportándose de modo inteligente como lo señala Ben-Jacob (1998)[6], (Ben-Jacob et al. 2006)[7]. Medición interna que define los ajustes estructurales y las acciones que inciden en el entorno. Además, así como en este caso se ha considerado al ADN como un sistema en superposición y la célula como el entorno que ejecuta mediciones, también podríamos correr la frontera cuántico clásico, de manera que la célula sea pensada como un sistema en superposición que es medido por el medio ambiente externo. Esta última situación resulta ser más interesante para abordar el problema de la adaptación (Bordonaro & Ogryzko 2013)[11].

La información cuántica no accesible permanece en estado potencial “esperando” condiciones adecuadas del entorno que permitan actualizarla, en este sentido la información total permanece constante, lo que pasa es que los diferentes estados posibles varían en probabilidad. La información seleccionada se hace altamente probable y conduce a estados clásicos que tienden a reproducirla, la información inaccesible sigue siendo posible

aunque las probabilidades de accesibilidad en un espacio tiempo determinado sean extremadamente bajas. La información potencial inaccesible constituye un reservorio latente de información que nunca es borrado definitivamente. Resumiendo, la tesis de Zurek (2002, 2003)[41][42] sobre la decoherencia, a pesar de alejarse de la interpretación de Copenhague, no puede evadir el problema de la medición cuántica, sino que da cabida a sistemas procesadores y usuarios de información que como los seres vivos interactúan a consecuencia de la intermediación dada por el entorno. Un sistema observador incide sobre otro, imponiendo un tipo de restricción conducente a una disminución del número de conformaciones posibles. En esta guisa un sistema observado es un sistema que es afectado por otro llamado observador. Tanto observadores como observados son sistemas, o entidades que interactúan, donde los unos son parte del entorno de los otros. Se trata de observadores no necesariamente conscientes, sino dotados de la capacidad para ajustar sus parámetros estructurales en relación a la interacción con otros en un contexto medio ambiental determinado. Cuando una experiencia perceptual asociada a un sistema observador da lugar a un ajuste estructural entre dos opciones accesibles igualmente probables, inyecta 1 bit de información en el repositorio de información que especifica las probabilidades relativas para que ciertos estados futuros posibles en efecto tengan lugar (Stapp 2004)[33].

En conclusión, la existencia de propiedades clásicas se debe a la interacción entre sistemas que pasan de lo cuántico a lo clásico, en un medio ambiente local determinado. Esta hipótesis ofrece un esquema que permite pensar la generación y modificación de las formas, algo que la tesis de Shannon no logra hacer por cuanto nunca habla de cómo se generan las fuentes clásicas de información y menos aún cómo se modifican. Por el contrario, la decoherencia cuántica abre el camino para entender el universo como una red de sistemas cuánticos (a la vez observadores y observados) que interactúan mediatizados por el entorno y que por tanto están sujetos a la adopción de una mezcla de estados clásicos posibles permitidos por la selección inducida por el entorno. Es decir, los sistemas al interactuar en un medio ambiente determinado, exhiben



una pérdida parcial de la coherencia la cual conduce a una sucesión de afinamientos estructurales por rupturas de simetría a lo largo del desarrollo que dan lugar a una forma funcional y estructuralmente integrada con el medio ambiente. Tesis semejante a la defendida por Longo y Montévil,(2011)[26] la cual conduciría a considerar la afinación estructural en el desarrollo y la evolución adaptativa como fenómenos íntimamente relacionados.

## **2. El medio ambiente como inductor y selector de características actualizadas en los sistemas clásicos**

De acuerdo a la tesis de la decoherencia de Zurek (2002, 2003)[41][42], también conocida como “darwinismo cuántico”, todos los sistemas compiten con otros por la detección de fotones portadores de señales potencialmente informativas, pero el entorno absorbe rápidamente mucha más información, de modo que la información disponible para los sistemas está restringida a los “estados preferidos” u observables que previamente han sido seleccionados por dicho entorno. De esta manera se garantiza la correspondencia fiel de los registros de medición con los observables medidos (Zurek, 1991, 1998a, 1998b [38][39][40]; Tegmark, 1999)[31]. Los estados clásicos de los sistemas corresponden a la información estable seleccionada por el entorno. Zurek (2002, 2003, 2009)[41][42][43] compara el medio circundante con una inmensa cartelera de avisos publicitarios de diversa índole, donde entre más estados punteros preferidos logren posicionarse, es decir aparecer en el mundo clásico, mayor es el número de anuncios que aparecen y mayor el número de estados punteros que se inducen para volver a producir la misma información. De esta manera la creación del mundo clásico se auto-refuerza permanentemente. Entre más tengan lugar las mediciones y percepciones que dan lugar a la aparición de la materialidad clásica, la campaña publicitaria se hace más pugnaz, estabilizando cierto patrón medio ambiental que facilita que dicha medición y percepción de la realidad material ocurra de nuevo en el futuro. Pero la selección de estados preferidos por el entorno es indisociable de la inducción de los mismos, a causa de la interacción entre el sistema cuántico y dicho entorno.

Los sistemas existentes pueden ser estudiados, investigando tanto

los factores del entorno que inciden y provocan en ellos cambios de estado, así como los efectos ambientales que ellos generan. Por ejemplo, para que un sistema A establezca una interacción con uno B, se requiere que A detecte en el entorno E perturbaciones físicas provenientes de B, y que además las interprete como señal informativa, es decir que provoque un cambio de estado en A en función de B en el contexto dado por E. Lo mismo vale en sentido contrario. En otras palabras, no hay interacciones directas, sino que siempre están mediatizadas por el entorno o medio ambiente, el cual se convierte en un espacio de relaciones altamente heterogéneo y asimétrico. Una vez se establece la interacción entre A y B, ambas han cambiado y han provocado un cambio en el entorno E. Por tanto, podemos estudiar los sistemas a través del espacio-tiempo o ambiente de relaciones en que ellos actúan.

El darwinismo cuántico trata de la selección de estados virtuales en superposición a nivel de sistemas cuánticos individuales y no de la selección natural en una población de formas actualizadas en el mundo real. Los estados virtuales en superposición “luchan” por sobrevivir como información actualizada detectable como características observables en un entorno determinado. No son los sistemas los que compiten en una población, sino la información asociada al sistema cuántico individual, en estado de coherencia o de superposición. En un medio ambiente se pierden una información y en otros otra, dando lugar a una selección de estados preferidos diferente de acuerdo al ambiente. Hay que subrayar la diferencia entre el caso darwiniano clásico que trata de la competencia al interior de una población de individuos por recursos energéticos para su supervivencia y la trasmisión de información a la descendencia, y el caso cuántico que trata de la competencia entre estados virtuales en superposición en sistemas cuánticos individuales por su propagación como información actualizada. Es como si la información responsable de las características predicables luchara por salir de un mundo virtual para actualizarse en objetos que bien pudieran haber presentado otras características. Esta diferencia es conceptualmente muy significativa y difícil de captar, puesto que hemos adoptado en la ciencia una perspectiva realista en la que la objetividad de las cosas no se discute. Hecho que se refleja

en un lenguaje basado en la realidad de los objetos que designa, donde los sustantivos y los pronombres cobran protagonismo, mientras ahora, con la cuántica, se le daría prioridad a un conjunto de parámetros medibles u observables, atribuibles a sistemas cuyas determinaciones posibles son inagotables.

Para entender mejor la apropiación por parte de la física cuántica, del concepto de selección darwiniana que se creía exclusivo de la biología comencemos por recordar que el comportamiento que observamos de las partículas subatómicas riñe con la experiencia que poseemos del mundo macroscópico, por ejemplo un electrón no sigue una trayectoria predecible y definida sino que en el intervalo entre las mediciones se encuentra simultáneamente en una superposición de todas las trayectorias posibles, mientras que al medir las coordenadas de posición colapsa en uno de los muchos estados posibles. Para ello basta con que el electrón interactúe con otra entidad del entorno, el aparato de medida. Zurek (2003, 2009)[42][43] precisa que no podemos medir al electrón directamente, sino que medimos una pequeña parte del medio que lo circunda, capturando la información que necesitamos para inferir su posición. En este caso el electrón interactúa con el ambiente y deja una huella, de modo que una región del ambiente contiene solo una parte de la información del estado cuántico original, y en consecuencia los estados preferidos se reproducen en una multiplicidad de copias similares aunque no enteramente idénticas a la original. Pero teniendo en cuenta que el entorno local cambia, el estado del electrón debe adaptarse produciendo nuevos estados “sucesores” dotados con propiedades aptas para la estabilización y propagación (sobrevivencia). Los estados cuánticos se definen de acuerdo a la información que transportan, pero la cantidad de información que se puede actualizar en un lugar y momento determinado del espacio-tiempo es limitada y por eso los estados “sucesores” deben competir para existir en el mundo clásico (actualizarse) o de lo contrario se pierden incrementando la entropía térmica del ambiente circundante. Es decir que los medio-ambientes, entendidos como subregiones del universo, resultan ser disímiles, puesto que el estado cuántico inicial ha producido “estados sucesores” ligeramente diferentes

entre sí, mientras que los no seleccionados no sobreviven y la información que contienen se vuelve ilegible e inmensurable para otros observadores. Pero en cuanto la cantidad de información que una cierta región del ambiente puede contener es limitada, podemos hablar de competencia por un recurso limitado, donde los estados más adaptados al ambiente en el que puede replicarse constituyen los estados que en efecto pueden medirse y que consideramos como reales. En otras palabras los estados cuánticos seleccionados se propagan dejando copias ligeramente diferentes que contienen una parte de la información original.

Por esta razón varios autores consideran que el “darwinismo cuántico” satisface los criterios del darwinismo universal establecidos por Dawkins (1976)[14], Dennett (1995)[15] y Blackmore (1995)[10] (Campbell 2010)[12]. De acuerdo a estos criterios todo proceso darwiniano de evolución adaptativa se caracteriza por realizarse en tres pasos: 1) replicación o reproducción, 2) generación al azar de una población de variantes heredables, 3) supervivencia diferencial de la descendencia por razón de estas variaciones. Cualquier población que cumpla estos tres pasos, independientemente de cuál sea su composición material evolucionara indefectiblemente hacia una mayor supervivencia y adaptación. No obstante, para que la producción de formas adaptadas tenga lugar no es suficiente con el algoritmo darwiniano, sino que los sistemas deben estar en capacidad de elaborar un “modelo interno” del efecto del medio ambiente sobre el sistema y del sistema sobre el medio ambiente (Campbell 2010)[12]. Pero como veíamos, el vector de estado contiene la información concerniente a todos los estados posibles a los que el sistema cuántico puede acceder al evolucionar de acuerdo a la ecuación de Schrödinger cuyo operador Hamiltoniano ( $H$ ) comprendía información sobre los estados internos del sistema, los efectos del sistema sobre el entorno y los efectos del entorno sobre el sistema. Información que se pone al día permanentemente, mediante la selección de los estados adaptados. Es decir, los sistemas simulan las interacciones del sistema cuántico con el entorno y anticipan los resultados de su interacción con el ambiente, para decidir los ajustes estructurales y las consiguientes acciones a implementar,

requeridos para mantener un encaje estructural-funcional entre ellos y su entorno a lo largo de su ciclo de vida.

Postular la existencia de estados de coherencia y/o intermedios entre la coherencia y lo clásico en los sistemas vivientes ayudaría a entender la inseparabilidad entre ellos y sus entornos, así como entre sus subunidades constitutivas. La coherencia cuántica podría explicar los fenómenos de auto-organización, las dinámicas no lineales en desequilibrio térmico y la emergencia de sistemas organizados más complejos. El estudio de los estados de coherencia deben conducirnos a reorientar el enfoque clásico centrado en partículas, y entidades constitutivas, hacia uno centrado en procesos e interacciones, de esta manera se tienden puentes entre la física y la biología en beneficio de ambas disciplinas.

### **3. Epigénesis y sistemas “quantum-like”**

Quisiera mostrar que la decoherencia cuántica permite entender el desarrollo o la epigénesis como una sucesión de estados inestables a estados más estables a causa de la interacción con el medio ambiente. De acuerdo a Oyama (2000)[29] la información debería entenderse como el proceso de adquisición de una forma o estructura determinada, la cual surge, se manifiesta o actualiza durante el desarrollo embriológico mediante la confluencia de una diversidad de factores formativos que, además de los genes, incluyen factores celulares, hormonales, nutricionales, ambientales, sociales, conductuales, culturales,.. etc. Es decir que la información no se debe únicamente a los genes, sino a la convergencia de todos los factores formativos tanto internos como externos que, en un momento y lugar determinados inducen los estados subsiguientes que el sistema puede adoptar. En esta perspectiva la adaptación resulta de una sucesión de ajustes físicos estructurales y funcionales que se estabilizan por interacciones epigenéticas en un contexto medio ambiental dado a lo largo de la ontogenia (Jablonka & Lamb 1998, 2006)[22][23]. Por tanto, se sugiere que el formalismo de la física cuántica puede ser apropiado para describir la plasticidad fenotípica de los organismos en respuesta al ambiente, idea que se ha ilustrado recurriendo al “paisaje epi-genético” de Waddington (1957)[35], Slack (2002)[30] (ver figura 1).

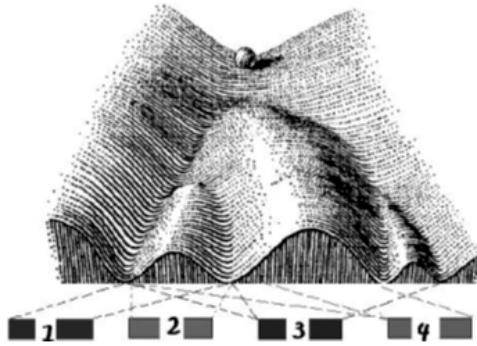


FIGURA 1. (Figura modificada a partir de Waddington, (1957)[35], (Slack 2002)[30]). El paisaje epi-genético ilustra como las vías de desarrollo celular se habilitan en puntos de bifurcación a medida que el proceso transcurre de un estado indiferenciado inestable, totipotente, (arriba) a estados diferenciados estables (abajo). La superficie curva ondulada representa la modulación de las vías de desarrollo a consecuencia de la interacción permanente de la célula con el medio ambiente. Los cuadros numerados abajo representan las redes génicas que posibilitan la diferenciación y estabilizan las formas diferenciadas. Este modelo es susceptible de ser interpretado como un proceso de decoherencia, en el que la bola colocada arriba representaría el potencial de una célula en un estado de superposición, coherencia o estado “quantum-like”. Las bifurcaciones representarían puntos inestables en los que se decide a consecuencia de un procesos análogo a la medición cuántica, una de las alternativas estructurales accesibles, dicha pérdida de coherencia da lugar a restricciones morfo-genéticas. Los valles representarían los estados accesibles “preferidos” o vías canalizadas donde actúan las restricciones dando lugar a estados en decoherencia cuya profundidad correspondería a los umbrales de estabilidad termodinámica.

Asano et al, (2013)[4] explican cómo las epimutaciones moleculares inducidas por el ambiente se transmiten de la célula madre a la hija. Las células en proceso de diferenciación definen el patrón de epimutaciones que las conducen a un acoplamiento con el medio circundante. El modelo asume que la célula parte de un estado de alta incertidumbre acerca de los posibles estados que pueden generarse en la interacción con el medio circundante. Incertidumbre que se resuelve en una sucesión de mezcla de estados cada vez más probables y estables generados por la interacción y el acople con factores del entorno. El paso de la superposición a la decoherencia explicaría por qué a medida que las células se diferencian se hacen

más estables, entrelazándose con el ambiente circundante. Es decir, la epigénesis es un proceso análogo a la decoherencia cuántica en el que el estado de superposición inicial en interacción con el medio ambiente da lugar a una distribución estadística de estados clásicos.

A diferencia del algoritmo (neo-)darwiniano explicado anteriormente, el modelo epigenético (neo-)lamarckiano se describe en cuatro pasos: 1) la generación de epimutaciones en la interacción entre el sistema y el entorno, 2) la selección interna de epimutaciones a nivel individual, 3) la estabilización del fenotipo individual, 4) la selección natural de fenotipos a nivel poblacional.

Por ejemplo, las histonas que conforman los nucleosomas de la cromatina, poseen colitas que pueden ser modificadas químicamente dando lugar a miles de variaciones diferentes. Se ha identificado una modificación específica que se asocia a una estructura alterada de la cromatina (Henikoff & Shilatifard 2011)[18]. Dada la multiplicidad de modificaciones estructurales que pueden ser correlacionadas con cambios epigenéticos importantes, se ha sugerido la existencia de un código de histonas que opera de modo complementario al código genético (Jenuwein & Allis 2001)[20]. El epigenoma y el ambiente interactúan afectando el proceso epigenético a escala química en tiempo real. Mientras que el genoma guarda un registro de la historia evolutiva en miles de millones de años, el epigenoma explica la habilidad para responder al entorno por parte de las células y/o del organismo. No existe un programa que controle los procesos epigenéticos, sino que se trata de un control distribuido entre diversas estructuras (colitas de histonas, nucleosomas, patrones de metilación, empacamiento de la cromatina, ...). El epigenoma es, por tanto, una característica de un sistema global, o mejor un objeto virtual que ejerce una influencia real, sobre la activación y/o represión de los genes.

En la física clásica la magnitud de la fuerza que opera mediante leyes deterministas, es indiferente al estado actual de los cuerpos, y se estima en función de la masa, la distancia y el tiempo. La dinámica de un sistema nunca se ve afectada por la evolución de los estados por los que transcurre, dado que las leyes son indiferentes a los estados y el Hamiltoniano independiente del

tiempo. En el estudio de los seres vivos se ha intentado aplicar el mismo esquema, pero a costa de desechar la existencia de una tendencia espontánea a la transformación e integración entre ellos y su entorno. En consecuencia, se impuso una visión fundada en la causalidad donde lo micro determina lo macro. Pero, si se incorporaran en las ecuaciones términos que modifiquen o contrarresten la dinámica especificada en el Hamiltoniano, por ejemplo términos que contengan información biológica funcional, la dinámica del sistema dependería de los cambios de estado. En el caso de la cromatina, los estados dados por modificaciones químicas se podrían equiparar a fuerzas no-locales que representan información funcional (semántica) y contextual que podría incluirse como términos adicionales al Hamiltoniano. De esta manera, tendríamos un acople entre la dinámica o comportamiento del sistema y las leyes que lo rigen, las cuales dependerían del tiempo y cambiarían de acuerdo al estado informacional del sistema, mostrando como el control epigenético se ejerce sobre la cromatina. Esta estrategia reconoce la existencia de bucles de retroalimentación que conectan diversos niveles de organización lejos del equilibrio térmico (Goldenfeld & Woese 2011)[16].

Siendo la célula un sistema complejo compuesto por millones de subsistemas, el uso operacional del entrelazamiento sirve para representar la dinámica de las correlaciones del sistema (S) y el impacto sobre el medio ambiente (E). En principio sería posible representar el conjunto de estados epigenéticos posibles (por ejemplo, las modificaciones epigenéticas en el ADN dadas por metilación de las bases citosinas) asociadas a los diferentes fenotipos posibles. Por otra parte, habría que estar en capacidad de representar todas las configuraciones medio ambientales posibles asociadas a los diferentes fenotipos posibles. El entrelazamiento entre S y E descritos por productos tensoriales, daría lugar a espacios de enormes dimensiones que describirían la dinámica del epigenoma, dado que cambios en la expresión de un solo gen inciden inmediatamente en la expresión de otros genes.

Este modelo permitiría capturar la no localidad y cuasi simultaneidad de las variaciones epigenéticas en una célula viva.



Por el contrario, el gradualismo darwiniano sería incapaz de explicar la rapidez de la evolución epigenética. La evolución en el caso de grandes números de genes sería muy lenta si las epimutaciones que inducen nuevos niveles de expresión génica fueran generadas independientemente al azar antes de ser seleccionadas. Si el medio ambiente actúa sobre genes  $g_1 \dots g_m$ , supongamos que, para un gen individual,  $g_1$ , una epimutación  $Mg_1$  ventajosa, sería seleccionada. Pero en caso de que esta epimutación perturbe negativamente el funcionamiento de otros genes, no podríamos explicar cómo las epimutaciones ( $Mg_1, \dots, Mg_n$ ) inducidas por el medio ambiente dan lugar a patrones consistentes de expresión génica. Si por iteración se producen dichas epimutaciones, la célula percibe la descoordinación entre los niveles de expresión génica, y nuevas epimutaciones se inducirían por esta inconsistencia y así sucesivamente. Un proceso de esta naturaleza inspirado en el gradualismo darwiniano tomaría mucho tiempo en comparación a las escalas de tiempo correspondiente al ciclo de vida de una célula. Pero si, por el contrario, la dinámica de las epimutaciones estuviera entrelazada, todas serían consistentes y se manifestarían en un solo paso.

Un modelo de evolución epigenética basado en sistemas cuánticos (quantum-like) controlados por el entorno en combinación con el entrelazamiento entre diferentes genes, se ajusta muy bien al modelo de canalización epigenética descrito como los valles profundos del paisaje epigenético de Waddington (Sollars et al, 2003)[32] (figura 1). Además, la idea de “propagación del entrelazamiento” hace viable la herencia epigenética descrita por Jablonka y Lamb (1998, 2006)[22][23], y contribuiría enormemente a desmontar los argumentos que se han esgrimido en contra de la herencia de los caracteres inducidos por la interacción de los organismos con su entorno. El enfoque (neo-)darwiniano basado en mutaciones azarosas e independientes antes de la selección es incapaz de explicar esta rápida dinámica evolutiva que permite la coordinación de diferentes cadenas causales contribuyendo simultáneamente tanto a la estabilidad como a la plasticidad de los fenotipos, condición que favorece la adaptación.

#### **4. Reflexiones finales**

El problema de cómo y por dónde trazar una frontera entre sistema y entorno ha constituido un problema tanto para la mecánica cuántica, como para la biología. Se ha asumido que el entorno es todo lo que rodea a un sistema, y cuyo papel se circunscribe al establecimiento de las condiciones restrictivas de frontera. Los entornos de un sistema perteneciente a un nivel de organización determinado, contienen entidades pertenecientes a distintos niveles de organización desde partículas dispersas en movimiento presumiblemente azaroso, como fotones, quarks, partículas subatómicas, protones, neutrones, átomos, moléculas, virus, bacterias, células, organismos, comunidades bióticas, plantas, animales humanos y sus productos tecnológicos como aparatos de medida, ciudades, ... etc. Las entidades de menor escala predominan por factores de varios órdenes de magnitud, mientras que las de mayor escala son muchísimo menos abundantes. Las partículas subatómicas aparecen tanto en los extremos inferiores como los superiores de las escalas jerárquicas de organización, no solo conforman el tejido de los microambientes internos, sino que participan del entramado que configura los ambientes externos. En otras palabras, los sistemas organizados a cualquier escala participan en la conformación de su entorno, así como el entorno se pliega hacia adentro especificando los sistemas inmersos en él. Sistemas y entornos se transforman permanentemente, dando lugar a nuevos sistemas y nuevos entornos mutuamente implicados los unos en los otros. Escarbar en los niveles últimos constitutivos de la materia conduce inevitablemente a concentrar la mirada en las partículas cuya inmensa mayoría estaría entrelazada con otras dispersas en el medio ambiente. No existen medios ambientes absolutos esperando ser llenados por ciertos sistemas que los ocupan, sino que hay que definirlos en relación al conjunto de los factores que son significativos para cada uno de los sistemas contenidos en ellos. Es decir, los entornos transmiten señales o fluctuaciones originadas por unos sistemas y perceptibles por otros. Cada sistema delimita un sub-ambiente en función de los factores relevantes para dicho sistema, haciendo imposible la separación entre sistemas y sus entornos. Es decir, el ambiente de relaciones

ecológicas en la biología, encuentra un análogo en el espacio-tiempo de física que debe su existencia y topología a los sistemas que en él residen.

Los sistemas cuánticos pueden concebirse como dispositivos que no requieren energía para procesar la información. Según Landauer eliminar información (seleccionar) sin procesarla requiere de un gasto de energía de modo que la entropía aumenta en la computación a consecuencia del borrado de información (Landauer 1961)[25]. Este fenómeno se observa en los computadores corrientes que trabajan de modo irreversible, deduciendo “outputs” a partir de los “inputs”, pero según Bennet (1973, 1982)[8][9], teóricamente es posible diseñar un computador que no descarte información y que por tanto no consuma energía, dicho computador trabajaría reversiblemente, de manera que, en cada paso, el “input” puede ser deducido a partir del “output”. La máquina al funcionar en reverso deshace cada paso, pero sin borrar la información y por tanto no habría pérdida de energía. Curiosamente, los sistemas cuánticos aislados trabajan de modo reversible y aunque pueden codificar una cantidad infinita de información, esta es en su gran mayoría inaccesible. La información inherente al sistema cuántico puro representa el potencial que puede transmitir, pero la que se actualiza equivale a las propiedades que se manifiestan por medio de la interacción con otros sistemas cuánticos. La información potencial se rige por las transformaciones cuánticas unitarias y reversibles, de acuerdo a las cuales el sistema cuántico también puede entrelazarse con otros, dando lugar a correlaciones no locales. En este sentido la información constituiría una categoría más general que la de energía. Pero la decoherencia conduce a estados clásicos seleccionando información y eliminando otra, consumiendo energía e incrementando irreversiblemente la entropía del sistema, el aparato de medición y el medio ambiente. La información absorbida en el medio ambiente se hace inaccesible, es decir posee una probabilidad muy baja, no obstante dicha información sigue siendo posible, dado que en otras condiciones podría ser seleccionada por otros agentes abriendo rumbos impensados a la evolución.

En consecuencia, la mecánica cuántica proporciona al menos dos aspectos interesantes para conceptualizar la información y

aplicables a la biología. (1) Leyes que rigen las transformaciones unitarias y el entrelazamiento (estados cuánticos puros, reversibilidad). (2) Diferencias irreducibles y contingentes que resultan de las interacciones entre sistemas abiertos (estados cuánticos mezclados, preferidos, irreversibilidad). Pero a causa de (1) y (2), a nivel local tienen lugar interacciones dinámicas responsables de la actualización de formas. Esta es justamente la decoherencia.

El concepto cuántico de información con énfasis en la información potencial, posee una mayor generalidad que las nociones clásicas que enfatizan la información recibida o actualizada, y serviría para justificar una interpretación semiótica. Mientras que para Shannon el flujo de información va de la fuente a un receptor, en la semiosis, existen bucles de retroalimentación que permiten identificar las perturbaciones físicas como signos de su fuente de origen. La fuente únicamente suministra un potencial que puede ser actualizado. Actualizar información es un término general que normalmente se utiliza como adquisición de información o como creación de información. La información no es solamente estructura formal actual, sino un potencial asociado a una magnitud física pura. Los sistemas cuánticos son la fuente de todas las formas existentes en el universo y de todos los grados de entrelazamiento o interconexiones que se dan entre ellas, además es la fuente de todas las formas que podrían existir en otros lugares y momentos del espacio-tiempo.

## Referencias

- [1] Andrade, E. 2003. Los demonios de Darwin. Semiótica y Termodinámica de la Evolución Biológica. UNIBIBLOS. Bogotá, Colombia.
- [2] Andrade, E. 2009. La ontogenia del pensamiento evolutivo. Colección Obra Selecta. Universidad Nacional de Colombia.
- [3] Andrade, E. 2014. Integration of thermodynamic, quantum and hierarchical theories of information in the context of Peircean semiosis. *BioSystems* 120: 10-20.
- [4] Asano, M., Basieva, I., Khrennikov, A., Ohya, M., Tanaka, Y., & Yamato, I (2013) Unifying cellular

- (neo)-Darwinism and (neo)-Lamarckism: a model of epigenetic evolution based on theory of open quantum systems. *Systems and synthetic Biology*. (<http://www.researchgate.net/publication/257719156>)
- [5] Auletta G. 2005 Quantum information as a general paradigm. *Found. Phys.* 35:787–815.
  - [6] Ben-Jacob, E. 1998. Bacterial wisdom, Gödel’s theorem and creative genomic webs, *Physica A* 248: 57–76.
  - [7] Ben-Jacob E., Yoash Shapira, Tauber A.I. 2006. Seeking the foundations of cognition in bacteria: From Schrödinger’s negative entropy to latent information. *Physica A* 359 (2006) 495–524.
  - [8] Bennett, C. H. 1973. ‘Logical Reversibility of Computation’, *IBM Jour. Res. Dev.* 17, pp. 525-32.
  - [9] Bennett, C.H. 1982. The Thermodynamics of Computation: A Review. *Int. Jour. Theor. Phys.* 21: 905-940.
  - [10] Blackmore, S. (1995). *The Meme Machine*. Oxford: Oxford University Press.
  - [11] Bordonaro, M. y Ogryzko, V. 2013. Quantum Biology at the Cellular Level. Elements of the research program. 1304.0683.
  - [12] Campbell, J. 2010. Quantum Darwinism as a Darwinian process. Cornell University Library.
  - [13] Conrad, M. 2001. Unity of measurement and motion. *BioSystems*. 60: 23–38.
  - [14] Dawkins, R. (1976). *The Selfish Gene*. Oxford: Oxford University Press.
  - [15] Dennet, D. (1995) *Darwin’s Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*. New York: Simon and Schuster; London: Allen Lane.
  - [16] Goldenfeld N., Woese C. 2011. Life is physics: evolution as a collective phenomenon far from equilibrium. *Annu. Rev. Condens. Matter Phys* Goldenfeld, Nigel and Woese, Carl 2011.
  - [17] Griffiths, P.E., Gray, R.D. 1994. Developmental systems and evolutionary explanation. In: *Journal of Philosophy*, 16. pp

277-304.

- [18] Henikoff S., Shilatifard A. 2011. Histone modification: cause or cog? *Trends Genet.* 27, 389-396.
- [19] Hoffmeyer, J. & Emmeche, C. 1991. Code-Duality and the Semiotics of Nature. En Anderson, M. & Merrell, F. (eds.): *On Semiotic Modeling*. Mouton de Gruyter, Berlin and New York, pp: 117-166.
- [20] Jenuwein T., Allis C. D. 2001. Translating the histone code. *Science* 293, 1074–1080.
- [21] Igamberdiev, A.U. 2008. Objective patterns in the evolving network of non-equivalent observers. *BioSystems.* 92: 122–131.
- [22] Jablonka, E. and M.J. Lamb. 1998. Epigenetic inheritance in evolution. *Journal of Evolutionary Biology* 11: 159-183.
- [23] Jablonka, E. and M.J. Lamb. 2006. *Evolution in Four Dimensions. Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life.* A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts. London, England.
- [24] Kauffman, S. 1993. *The Origins of Order Self-Organization and Selection in Evolution.* New York, Oxford University Press.
- [25] Landauer, R. 1961. Irreversibility and heat Generation in the Computing Process. *IBM Journ. Res. Dev.* 5 183-91.
- [26] Longo, G. & Montévil, M. 2011. From physics to biology by extending criticality and symmetry breakings”. *Progress in Biophysics and Molecular Biology.* 106: 340-347.
- [27] McFadden, J.2000. *Quantum Evolution: Life in the Multiverse.* Harper Collins.
- [28] Morowitz, H. (1992) *J Beginnings of cellular life : metabolism recapitulates biogenesis* New Haven : Yale University Press, 1992.
- [29] Oyama, S. 2000. *The Ontogeny of Information. Developmental Systems and Evolution,* 2a edicion. Duke University Press, Durham.
- [30] Slack, J. (2002) *Conrad Hal Waddington the last Renaissance*

- biologist? *Nature Reviews Genetics* Vol. 3. pp: 889-895.
- [31] Tegmark, M. 1999. The importance of quantum decoherence in brain processes. Cornell University Library.
- [32] Sollars V., Lu X, Xiao L., Wang X., Garnkel M.D., & Ruden, D. M. 2003. Evidence for an epigenetic mechanism by which Hsp90 acts as a capacitor for morphological evolution *Nature Genetics*, 33, 2003, 70-74.
- [33] Stapp, H. 2004. *Mind, Matter and Quantum Mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg p268.
- [34] Uexkull, J. von 1982 [1940] *The Theory of Meaning*. *Semiotica* 42/1: 25-82.
- [35] Waddington, C.H. 1957. *The Strategy of the Genes*. Geo Allen & Unwin. London.
- [36] Wachtershauser G. (1990). Evolution of the First Metabolic Cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87, 200-204.
- [37] Wheeler, J. A. [1990] 1990. Information, Physics, Quantum: The search for Links, in W. H. Zurek (ed.), *Complexity, Entropy and the Physics of Information*, Addison-Wesley, Redwood City, 1990: 3-28.
- [38] Zurek, W.H. 1991. Decoherence and the transition from quantum to classical. *Phys.* (1991): 36–44.
- [39] Zurek, W.H. 1989a. Algorithmic randomness and physical entropy. *Physical Review A*. 40. 8 (1989a): 4731 - 4751.
- [40] Zurek, W.H. 1989b. Thermodynamic cost of the computation, algorithmic complexity and the information metric. *Nature*. 341: 119-124.
- [41] Zurek, W.H. 2002. Decoherence and the Transition from Quantum to Classical—Revisited. *Los Alamos Science*. 27: 1-25.
- [42] Zurek, W.H. 2003. Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Reviews of Modern Physics*. 75: 715-775.
- [43] Zurek, W.H. 2009. *Quantum Darwinism*. Cornell University Library.