

# LA EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS SEGÚN EL “DARWINISMO CUÁNTICO” DE ZUREK<sup>1,2</sup>

## THE EVOLUTION OF COMPLEX ADAPTIVE SYSTEMS ACCORDING TO ZUREK’S “QUANTUM DARWINISM”

Eugenio Andrade<sup>3,4</sup>

### RESUMEN

En este artículo argumento a favor de una integración no reductiva entre aproximaciones físicas y biológicas, basado en la noción de información como interpretación. Para ello esbozo un esquema fundado en la semiosis de Peirce en el que la relación entre las perturbaciones físicas del entorno, y las respuestas (internas y externas) están mediatizadas por el “sistema de interpretación” que las detecta e interpreta como señales informativas, dando lugar tanto a ajustes estructurales internos, como a acciones implementadas sobre el medio ambiente externo. En consecuencia argumento que los “sistemas de interpretación” pueden equipararse a agentes colectores y usuarios de información de Zurek (IGUS) y a sistemas complejos adaptativos (SCA). Para aplicar este modelo al problema de la adaptación evolutiva examino la teoría de Zurek denominada “darwinismo cuántico” (DC), según la cual el entorno elimina de los sistemas cuánticos la inmensa mayoría de las superposiciones dejando únicamente los “estados preferidos”, entre los cuales se escogen los que de hecho se pueden realizar en el mundo clásico. Elección entre alternativas estructurales accesibles que se deciden en la interacción entre los SCA y su entorno. Para concluir justifico como la semiosis permite aplicar el “darwinismo cuántico” a la evolución de SCA, proponiendo que el debate entre las escuelas (neo)-lamarckiana y neo-darwiniana debe ser repensado en términos más acordes con la física cuántica. Finalmente, la semiosis (es decir la información entendida como interpretación) justificaría la analogía profunda entre los modelos físico-cuánticos y biológicos de evolución adaptativa.

**Palabras claves:** Darwinismo cuántico, (Neo)-lamarckismo, Selección natural, Información, Sistemas complejos adaptativos.

### ABSTRACT

I argue for a non-reductive integration between physical and biological approaches based on the notion of information as interpretation. Thus I outline a scheme based on Peirce’ semiosis in which the relation between environmental physical perturbations and

1 Recibido: 18 de julio de 2016. Aceptado: 12 de diciembre de 2016.

2 Este artículo se debe citar así: Andrade, Eugenio. “La evolución de los sistemas complejos adaptativos según el “darwinismo cuántico” de Zurek”. *Rev. Colom. Cienc.* 17.34 (2017): 41- 73

3 Profesor Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia. Miembro del grupo Analima Universidad El Bosque. Correo electrónico: leandradep@unal.edu.co.

4 Bogotá (Colombia).

responses (internal and external) are mediated by the “system of interpretation” that detects and interpret them as informative signals, so giving rise to structural internal accommodations and to actions that are implemented on the external environment. Therefore I argue that “systems of interpretation” can be equated to Zurek’s information gathering and using systems (IGUS) and complex adaptive systems (CAS). In order to apply these model to the problem of adaptive evolution, I examine Zurek’s theory known as “quantum Darwinism”, according to which the environment eliminates the immense majority of the super-positions of quantum systems leaving only the “preferred states”, among which are chosen those that are in fact can be realized in the classical world. To end up I justify that semiosis permits to apply quantum Darwinism to the evolution of CAS, and I argue that the debate between (Neo)-Lamarckian and Neo-Darwinian schools must be reassessed in terms more in accord with quantum physics. Finally semiosis (that is information understood as interpretation) would justify the deep analogy between quantum physical and biological models of adaptive evolution.

**Keywords:** Quantum Darwinism, Neo-Lamarckism, Natural selection, Information, Complex adaptive systems.

## 1. SEMIOSIS: UN ESQUEMA APROPIADO PARA ESTUDIAR LOS SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTATIVOS

Charles S. Peirce (1891) esbozó una cosmovisión fundamentada en los significativos avances de la ciencia del siglo XIX y principios del XX, especialmente en lo concerniente al aporte de Boltzmann y Maxwell en la mecánica estadística, y de Lamarck, Darwin y del paleontólogo Clarence King, precursor de la idea de evolución por saltos, en lo concerniente a las teorías biológicas de la evolución. Tanto la termodinámica como la evolución biológica son dos líneas de investigación nacidas y desarrolladas en campos disciplinares muy diferentes, que sin embargo apuntan en una misma dirección, la naturaleza cambiante y evolutiva no solo de los seres vivos sino de los sistemas físicos.

De acuerdo a Peirce (2228- 2274) los procesos de cambio se puede entender mediante la relación semiótica en la que distinguimos tres componentes, a) objeto (O), b) signo o sistema de interpretación (S), c) interpretante (I), la cual se explica como: “entrada (input) (O)  $\Rightarrow$  intermediación (S)  $\Rightarrow$  salida (output) (I)”. En este esquema: a) la entrada son las fluctuaciones físicas (ondas sonoras, chorros de fotones, dispersión de moléculas en aerosoles, gradientes térmicos, etc.), emitidas por los objetos presentes y cambiantes del entorno, las cuales son susceptibles de ser potencialmente interpretadas como señales informativas. b) La intermediación que equivale al procesamiento del input externo ejecutada por parte de un “sistema de interpretación”, en un contexto medio ambiental específico, el cual guía la elección de los outputs en la forma

de ajustes estructurales internos a adoptar y de las respuestas o acciones a ser implementadas. c) La salida que corresponde a la ejecución de dichas acciones, es decir la implementación efectiva de restricciones internas y las consiguientes acciones (conductas) proyectadas sobre el entorno. Ambas respuestas modifican y retroalimentan al “sistema de interpretación”<sup>5</sup>; de modo que la viabilidad de los ajustes estructurales internos se garantiza por un monitoreo de funcionalidad a nivel interno, y por la selección natural (SN) que asegura la propagación del cambio evolutivo a nivel poblacional en un entorno determinado. En pocas palabras la interpretación de señales por parte de los sistemas, se constituye en la base del encaje funcional adaptativo entre las partes internas del organismo, por un lado, y entre el organismo como un todo (“sistema de interpretación”) y el medio ambiente (contexto de interacciones), por el otro.

Este modelo descrito por Peirce (2228- 2.274) como semiosis, suele confundir por cuanto la semiótica ha sido invocada principalmente en el ámbito de la lingüística, el arte y la comunicación, pero en este esquema se extrapola como metáfora apropiada para el mundo natural altamente interconectado en el que como reconocemos hoy en día, hay intercomunicación, creación y transferencias de información, aparición de nuevas funciones (significados) y cambio permanente. Es decir partimos del reconocimiento de un universo que a escala cósmica se desarrolla y evoluciona, pero también de un mundo viviente, compuesto de seres que experimentan, sienten, perciben, construyen modelos internos del entorno (Rosen 2000), poseedores de diversos tipos de inteligencias, emociones e impulsos que los incitan a interactuar y comunicarse de formas muy diversas. Hay que resaltar que en este esquema la noción de información aparece asociada a la de proceso morfo-genético como resultado de la acumulación de restricciones estructurales debidas a la interpretación de señales procedentes tanto del medio ambiente como de factores internos. La información en su acepción semántica es creación de significados, lo cual se hace evidente cuando ha sido recibida y ha causado algún tipo de modificación (ajuste interno y acción hacia el medio externo) en quien la recibe. Por esta razón las transferencias de información no se refieren a “bits abstractos” sino a perturbaciones físicas reales que son interpretadas como señales con contenido semántico y funcional por parte de sistemas receptores que como usuarios, la utilizan para estabilizar su estructura (estados de baja entropía), ajustándola a las condiciones de un medio ambiente determinado y así lograr sobrevivir mediante la utilización de gradientes de energía disponible.

---

5 En este trabajo me refiero, siguiendo a Salthe (1993), al signo de Peirce como un “sistema de interpretación”, noción que como se justifica resulta aplicable a los sistemas complejos adaptativos SCA y a los IGUS de Zurek por igual.

Reconozco que la noción de “interpretación” refleja un antropomorfismo que puede ser inconveniente, pero en la perspectiva de Peirce es simplemente expresión del hecho de que la correlación entre inputs y outputs, no es lineal, ni causal determinista<sup>6</sup> sino que se da en un contexto de interrelaciones en las que participan una diversidad de entidades y seres de la naturaleza. Además, en múltiples aproximaciones a la noción de información, la interpretación aparece como la característica más distintiva, por ejemplo para Bateson (1976)<sup>7</sup> la información está referida a toda diferencia que causa una diferencia en otro que la interpreta. Hay que destacar que en esta discusión el término interpretación no implica actividad racional consciente. En esta acepción la semiosis se refiere a la creación natural de sentido y significación por parte de los sistemas adaptativos que interactúan entre ellos y su entorno, para sacar ventajas funcionales de las perturbaciones físicas que al ser interpretadas como señales informativas guían los ajustes consecuentes de su estructura interna y la elección de las acciones proyectadas hacia afuera que contribuyen a la configuración del medio circundante que actúa como factor de selección.

De modo paralelo el estudio de la evolución de sistemas abiertos lejos del equilibrio térmico, también incluye aspectos semióticos al subrayar la importancia de la auto-organización, el procesamiento de información, la interacción dependiente del contexto medio ambiental físico, la incertidumbre, la retroalimentación, y en el caso de la cuántica nociones como superposición, coherencia, observación, medición, decoherencia, entrelazamiento que tal como discutiré más adelante podrían interpretarse dentro de este esquema (Andrade 2014a).

Con el objetivo de avanzar en esta discusión examinaré la propuesta del “darwinismo cuántico” (Zurek 2002; 2003; 2009), para mostrar como los SCA o IGUS, se equipararían a sistemas cuántico/clásicos que interactúan en un medio ambiente determinado, como agentes de “medición interna” en el sentido propuesto por Matsuno (1989; 1996; 2006), McFadden (2000), Conrad (2001) y Andrade (2000; 2014b). Estas consideraciones repercuten en la biología teórica por cuanto llevan a superar las visiones adaptativas de Lamarck y Darwin, ambas influenciadas en su formulación por los esquemas clásicos de la física.

---

6 A un “input” de baja intensidad a escala micro, corresponden “outputs” de mayor intensidad a escala macro, además a un mismo “input” puede corresponder más de un “output” según el contexto de interacciones.

7 Para Bateson (1976) “toda diferencia que provoca una diferencia” supone un sistema de interpretación en un contexto determinado. Esta formulación se ha considerado por Hoffmeyer (1996) como una definición semántica y pragmática de información.

Los SCA son equiparables a sistemas procesadores de información tipo IGUS

La noción de información subyacente a la metáfora del “demonio de Maxwell” y su pertinencia para la biología fue discutida originalmente por Thompson (1911), (Fox-Keller 2000) y dio origen al debate sobre si la vida violaba o no la segunda ley de la termodinámica. Baste decir aquí que Zurek (1989a; 1989b) propuso que el “demonio de Maxwell” se puede concebir como agentes que colectan y usan la información o IGUS (“*Information Gathering and Using Systems*”) que operan en condiciones de apertura al medio circundante y lejanía del equilibrio térmico. Kauffman (2000) propuso la extrapolación de este concepto para abordar el estudio de los seres vivos como agentes autónomos capaces de extraer energía. Posteriormente, Andrade (2003; 2004) mostró que esta idea abre la vía para una síntesis ampliada de la teoría evolutiva que enriquece la perspectiva neo-darwinista dándole cabida a interpretaciones (neo)-lamarckianas<sup>8</sup>. Binder y Danchin (2011) aplicaron esta idea al entendimiento de la actividad enzimática en los sistemas celulares.

El modelo describe sistemas que procesan información, como condición para extraer la energía requerida para su mantenimiento, propagación y reproducción. Para ello Zurek (1989a; 1989b) definió una magnitud denominada entropía física (S) que decrece en una proporción equivalente a la cantidad de trabajo o energía que puede ser extraída por un IGUS después de pagar el costo de registrar información. En consecuencia, para poder actuar sobre un elemento específico del entorno, los IGUS deben haber generado una imagen o representación interna del entorno circundante del cual forman parte, la cual orienta las acciones efectoras sobre los objetos del medio. De acuerdo a este modelo los IGUS obedecen a una lógica circular autorreferente, dado que la información captada del entorno incluye información de sí mismos, puesto que están inmersos en dicho entorno, a la vez que mediante su acti-

---

8 La distinción fundamental entre lamarckismo y neo-lamarckismo consiste en que el primero hace énfasis en la noción de auto-organización de la materia y en un hipotético plan de la naturaleza, mientras que el segundo destaca la herencia de las características adquiridas por el uso y desuso de los órganos, es decir los efectos del hábito en la modificación. Hoy en día, en cuanto la herencia epi-genética se enmarca dentro la auto-organización de sistemas complejos, se rehabilitan y asocian principios explicativos lamarckianos (auto-organización) con los neolamarckianos (herencia del carácter adquirido), aunque se rechace la existencia de un plan de la naturaleza. Por esta razón a lo largo de todo el texto utilizaré el término (neo)-lamarckismo.

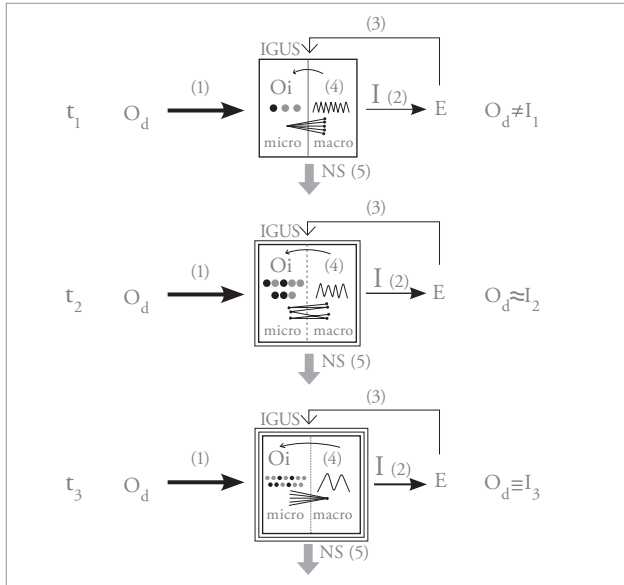
vidad contribuyen a su configuración y modificación<sup>9</sup>. El medio ambiente actúa como un canal de la información emitida por una diversidad de objetos, haciéndola disponible a otros SCA (IGUS<sup>10</sup>) los cuales capturan fotones, sustancias químicas, ondas sonoras, gradientes de temperatura, etc., que al incidir sobre los órganos receptores o sensoriales generan una imagen o representación interna del mundo externo, la cual induce la adopción de ajustes estructurales internos en el intento de preservar su “encajamiento” o ajuste funcional con el medio. En consecuencia la información del entorno se capta permanentemente y los registros informativos se van poniendo al día, mediante la auto-imposición de restricciones que ajustan el macro-estado más probable con elementos significativos del entorno.

En consecuencia los SCA poseen una estructura organizada en micro-estados [N-1] y Macro-estados [N] (Andrade 2003). El nivel [N] está en íntima interacción con el medio circundante [N+1] mediante el acomodo funcional con factores del entorno que el SCA distingue como relevantes. El nivel [N-1] almacena información acumulada a lo largo de la evolución en la forma de un registro codificado que posibilita y facilita la propagación y reproducción de los fenotipos exitosos [N]. El almacenamiento de la información registrada en modo digital ocurre mediante la generación de restricciones sobre el micro-estado a causa de los ajustes estructurales del macro-estado en un medio ambiente dado [N+1]. Los micro-estados así generados estabilizan a su vez los macro-estados realizados y hacen posible acceder o alcanzar otros nuevos macro-estados en un futuro inmediato. La acumulación de información a lo largo de la evolución obedece a la ley del incremento de entropía, puesto que el uso de la información permite que los SCA degraden los gradientes de energía detectados (contribuyendo a la maximización de la entropía global) con el fin de aprovecharlos para mantener su organización dentro de un umbral de estabilidad caracterizado por estados de mínima entropía mediante las restricciones impuestas por los macro-estados (Brooks et al. 1988). La SN favorece a los SCA más eficientes en la extracción de energía del entorno, los cuales a su vez son los que registran fielmente la información en dos modos, el genético (digital, información codificada a nivel de los micro-estados) y el feno-

9 Las teorías de construcción de nicho de Lewontin y Odling-Smee en biología, contemporáneas a la de Zurek en termodinámica y física cuántica muestran una convergencia interesante. La primera es una teoría de organismos que modifican el medio ambiente en el cual son seleccionados, mientras que la segunda es un modelo teórico aplicable a los organismos, pero no limitado exclusivamente a ellos. En este trabajo señalo la analogía que puede hacerse entre estas teorías desde la perspectiva de la noción de información como interpretación inherente al esquema de Peirce. Una vez más este esquema resulta muy útil para poner de relieve puentes conceptuales interdisciplinarios sin caer en un reduccionismo físico, ni en un pretendido holismo biológico.

10 El término IGUS, derivado de la termodinámica y la teoría de la información, puede con toda propiedad referirse a “sistemas complejos adaptativos” SCA ambos entendidos como “sistemas de interpretación de Peirce”.

típico (estructural, información estructural a nivel macroscópico), preservando simultáneamente ciertos grados de plasticidad estructural (Macro-estados) y de redundancia digital (micro-estados), (ver figura 1).



**Figura 1.** Iteración semiótica que muestra la transmisión de información del “Objeto externo” (input) al “Interpretante” (output) mediatizada por el “sistema de interpretación” (IGUS). Oe: objeto externo, emisor de perturbaciones físicas o “input”. Micro: micro-estados, registro digital, o representación interna de objetos externos. MACRO: macro-estados, registro estructural (análogo). IGUS: sistema de interpretación de las perturbaciones físicas como señales informativas. E: medio ambiente o entorno. Flechas: 1. de Oe al IGUS: efecto causal del objeto externo sobre los micro-estados. 2. Del IGUS a E: acción efectora o “output”. 3. De E al IGUS: restricciones del entorno hacia el IGUS, o retroalimentación. 4. De MACRO a micro: restricciones impuestas por los Macro-estados a los micro-estados, (causalidad descendente). 5. Flecha hacia abajo: selección natural. En una etapa temprana de la iteración  $t_1$ , hay baja correlación entre micro/Macro-estados y entre Macro-estados/entorno y, por tanto, a “un” registro digital le corresponden “muchos” en modo estructural. El Oe (input) y la acción resultante (output) no se corresponden. En una etapa avanzada de la iteración  $t_2$ , aumenta la correlación entre micro-estados/Macro-estados y entre Macro-estados/entorno y, por tanto, a algunos registros digitales le corresponden “uno a uno”, algunos registros estructurales. Hay correlación entre el Oe (input) y la acción resultante (output). En una etapa más avanzada de la iteración  $t_3$ , hay alta correlación entre micro-estados/

Macro-estados y entre Macro-estados/entorno, y, por tanto, a “muchos” registros digitales le corresponde “uno” estructural (análogo). Así, se alcanzan un alto grado de correspondencia entre el Oe y la acción resultante, puesto que la información ha sido transferida aunque el potencial interpretativo del objeto externo no se agota. La sucesiva iteración disminuye la incertidumbre sobre el estado Macroscópico del IGUS o la plasticidad de los Macro-estados, a la vez que aumenta el tamaño del registro digital de información, lo cual incrementa la correlación entre micro y Macro-estados por un lado y entre Macro-estados y el medio ambiente por el otro (Andrade 2014a).

Ganar, crear o actualizar información significa generar correlaciones entre posibles macro-estados y el entorno, y entre micro-estados y macro-estados a consecuencia de procesos de interacción entre el IGUS y su medio circundante. De acuerdo a Pattee (1995) la medición es una interacción entre un sistema observador y uno observado que genera correlaciones entre ellos. Para esto deben darse al menos dos pasos: (1) reconocimiento estructural conducente a un acoplamiento, mediado por un motivo utilizado por el observador como estándar de clasificación y comparación de una diversidad de factores externos, y (2) ajuste estructural interno o reducción del número de conformaciones accesibles para el estado acoplado con respecto al no acoplado. La información generada durante la interacción (medición), da lugar a correlaciones entre los estados del sistema medido del entorno y el sistema que mide en este caso un observador inmerso en el entorno dentro del cual se desempeña y que con sus acciones contribuye a configurar.

## 2. LA PERSPECTIVA JERÁRQUICA EN EL ESTUDIO DE LOS SCA

Como veíamos, para que un sistema [N] se comporte como SCA debe poseer una organización a partir de componentes o subsistemas constitutivos [N-1] a la vez que hacer parte de un sistema de orden superior [N+1]. Las características más notables serían: 1. Poseer una estructura o macro-estado demarcado del entorno por fronteras selectivamente permeables al medio (membranas, cápsula, estomas, piel, poros, sensores, receptores, órganos sensoriales, etc.). 2. Poseer micro componentes identificables individualmente dentro de dicha frontera. Estos microcomponentes en cuanto pueden ser influidos por perturbaciones físicas generadas por objetos presentes en el medio ambiente externo, sirven de base material para la construcción de representaciones internas del medio externo. 3. Formar parte de una población que está inmersa en un contexto de relaciones con otros IGUS semejantes pero no idénticos, y con otros muy diferentes. 4. Capacidad de elegir entre, al menos, dos configuraciones macroscópicas alternativas en condiciones locales específicas de entorno.



El bucle autorreferente en el procesamiento de información por parte de los SCA se comprende mejor desde una perspectiva jerárquica en la que se enmarcan las explicaciones basadas en alteraciones provocadas por los niveles inferiores (condiciones iniciales, causalidad ascendente, “bottom-up”), complementada con el efecto que los niveles superiores o “medio ambientes” ejercen sobre los niveles inferiores (condiciones de frontera, causalidad descendente, “top-down”). Los sistemas en cuestión [N], no solo están determinados y posibilitados por las condiciones iniciales definidas por el nivel inferior [N-1], ni restringidos por las condiciones de frontera impuestas por el nivel superior [N+1], sino que ellos mismos tienen comportamientos originales inesperados e irreducibles derivados de las elecciones que ejecutan, las cuales introducen ajustes estructurales novedosos de carácter adaptativo.

Por esta razón sin remontarnos a las explicaciones referidas a los niveles más extremos “inferiores” y “superiores”, sería importante poder referir los fenómenos asociados a cualquier nivel escalar determinado [N], al menos a los niveles contiguos y fronterizos tanto inferiores [N-1] como superiores [N+1]. Propongo que para entender los SCA a nivel [N] debemos reconocer como “*input*” las condiciones iniciales inherentes al nivel inferior [N-1], la “interpretación” dada por el propio nivel de referencia [N] en el contexto medio ambiental [N+1] el cual define las condiciones de frontera, y donde se recibe el efecto de la acción o “*output*” proveniente de [N] y desde donde se imponen restricciones a los niveles inferiores (retroalimentación y causalidad descendente).

En este esquema explicativo no hay necesidad de comprometerse con la definición de los niveles causales últimos, puesto que se acepta un reduccionismo moderado, a la vez que se recurre a una noción de “emergencia débil” en el sentido de Chalmers y Jackson (2001), para explicar la aparición de modificaciones estructurales y comportamientos inesperados de los sistemas, en condiciones de entorno determinadas. Es decir, una explicación de fenómenos referidos al nivel [N], por ejemplo de la célula y del organismo, debe también incluir tanto elementos pertenecientes a un nivel molecular [N-1], como al contexto medio ambiental [N+1], y además incluir correlaciones establecidas en el nivel propio del estudio, como consecuencia de su actividad creativa y autónoma. Es decir que las explicaciones basadas en una causalidad ascendente (referidas a los efectos de los niveles inferiores sobre los superiores) no tienen mayor poder explicativo que las basadas en una causalidad descendente (referida a los efectos de los niveles superiores sobre los inferiores).

En otras palabras en el estudio de los sistemas complejos, ambas explicaciones son igualmente importantes e imprescindibles, siendo necesario definir los contextos de validación de las explicaciones ecológicas, epigenéticas, evolu-

tivas, fisiológicas, genéticas y moleculares. Ningún nivel explicativo tendría la posibilidad de dar cuenta completa del fenómeno, así como ninguna parte del sistema puede ejercer un control exclusivo sobre las otras.

De este modo, se podría abordar la controversia entre escuelas (neo)-lamarckianas y neo-darwiniana sobre el posible efecto evolutivo trans-generacional de las variaciones epigenéticas surgidas como ajustes estructurales heredables o modificaciones epigenéticas de los niveles [N] posibilitadas por los factores moleculares genéticos o nivel [N-1] en las condiciones de un medio ambiente determinado [N+1]. En condiciones controladas sería en principio posible estimar la sensibilidad de los fenotipos [N] a los cambios ambientales [N+1] inducidos por presencia de sustancias químicas, condiciones de nutrición, interacción con otros organismos, etc., dejando por ejemplo la constitución genética intacta [N-1]. Igualmente la sensibilidad a perturbaciones genéticas [N-1] en un medio entorno estable [N+1] en condiciones altamente controladas, (Anway *et al.* 2005; Arai *et al.* 2009). Por esta razón definir líneas de dependencia causal, lleva a considerar a cada uno de los niveles como realidades ontológicas. Los sistemas a diferentes niveles escalares [N] surgen dentro de rangos espacio temporales definidos por su organización material, como resultado de procesos a niveles [N-1] cuyos componentes también contribuyen a configurar el entorno [N+1] en que [N] se manifiesta y actúa, de ahí la autorreferencia.

Por otra parte en los SCA como resultado de las interacciones entre los distintos niveles podemos constatar que un número cada vez mayor de micro-estados a un nivel [N-1] (por ejemplo genético) puede ser descrito por un único macro-estado al nivel [N] (por ejemplo a nivel celular y del organismo) en el contexto de un supra-nivel [N+1] (por ejemplo medio ambiente), (ver figura 1).

### 3. LA INTERPRETACIÓN DE COPENHAGUE DE LA REALIDAD “CUÁNTICA” Y “CLÁSICA”

Schrödinger (1944) sostuvo que la vida era explicable por leyes físicas, pero se preguntaba si las leyes clásicas eran suficientes o si, por el contrario, sería necesario asumir la vida como un fenómeno cuántico<sup>11</sup>. El problema de cómo relacionar el mundo cuántico con el clásico surge al considerar que el espacio

---

<sup>11</sup> “Living matter, while not eluding the ‘laws of physics’ as established up to date, is likely to involve ‘other laws of physics’... It is, in my opinion, nothing else than the principle of quantum theory over again”.

de Hilbert<sup>12</sup> que describe a los primeros es inmensamente grande, puesto que de acuerdo al principio de superposición cualquier combinación lineal arbitraria de estados cuánticos es posible. Lo cual implicaría que los estados clásicos con los cuales estamos familiarizados constituyen apenas una ínfima fracción de los posibles. Las diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica han aparecido justamente para tratar de entender las correspondencias entre los estados cuánticos y la realidad clásica.

De acuerdo a la Interpretación de Copenhague (IC) el estado de un sistema cuántico se representa como un vector en el espacio de Hilbert, el cual evoluciona de modo determinista, continuo y gradual, de acuerdo a la función de onda de Schrödinger<sup>13</sup>, hecho que contrasta con la existencia de un mundo macroscópico con estados discontinuos y discretos describibles por valores propios característicos. Bohr postuló la existencia de una línea divisoria entre el mundo clásico y el cuántico, o entre un mundo microscópico donde predomina la superposición, la indeterminación y el potencial informativo y un mundo macroscópico newtoniano donde predomina la determinación, la información actualizada en formas discretas, aunque el trazado de esta frontera sea evasivo y conceptualmente podamos correrla arbitrariamente. En esta distinción los aparatos de medición, así como los observadores pertenecen al dominio clásico, el cual se rige por leyes que establecen el marco necesario para entender el dominio cuántico. Para Bohr los dominios cuántico y clásico se conectan por medio de la medición, concebida como una intervención extra-física (la acción consciente del experimentador) que interrumpe azarosamente la evolución de la función de onda. En este proceso el dominio clásico macroscópico filtra de los muchos resultados posibles un resultado específico, provocando el colapso del micro-mundo cuántico. En este sentido Bohr sostuvo que era necesario tener en cuenta el contexto en que tienen lugar las mediciones cuánticas, es decir las contribuciones del aparato de medida, las propiedades del sistema cuántico y la medición. La inseparabilidad profunda entre los objetos cuánticos y los aparatos de medida hace que la realidad sea dependiente del contexto en que tiene lugar la observación y la medición. Esta

---

12 El concepto de *espacio* de Hilbert es una generalización del espacio euclídeo, la cual permite que nociones tales como ángulo entre vectores, ortogonalidad de vectores, teorema de Pitágoras, proyección ortogonal, distancia entre vectores y convergencia de una sucesión, aplicables a espacios de dimensión dos y tres, se extiendan a espacios de dimensión arbitraria, incluyendo espacios de dimensión infinita. Formalmente, se define como un espacio con producto interior que es completo con respecto a la norma vectorial definida por el producto interior. Un estado físico  $\alpha$  en un instante de tiempo  $t$  viene descrito por un vector unitario de un espacio de Hilbert complejo. Dicho vector se denomina vector estado o ket, y se denota  $|\alpha(t)\rangle$

13 Donde  $i$ : es la unidad imaginaria;  $h$ : es la constante de Planck normalizada ( $h/2\pi$ );  $H$ : es el operador Hamiltoniano, dependiente del tiempo, los observables corresponden a la energía total del sistema;  $r$ : es el observable posición;  $p$ : es el observable impulso.  $V$ : es la energía potencial.

interpretación de la mecánica cuántica deja sin resolver el problema de la emergencia del mundo clásico, en ausencia de observadores conscientes, a partir de un mundo cuántico fundamental propio de las partículas elementales. En otras palabras, para la IC los objetos no tienen una realidad independiente de la observación, es decir los electrones y fotones existen pero a consecuencia de la medición, la cual obedece a razones supuestamente extra-físicas. De acuerdo a este esquema, la mecánica cuántica no describe una realidad, sino los resultados de mediciones ejecutadas con aparatos macroscópicos, dejando sin resolver la correlación entre el vector de estado que describe la función de onda y la realidad “objetiva” producida por la medición, o sea la relación entre inputs cuánticos microscópicos y outputs clásicos macroscópicos.

La inexistencia de una realidad objetiva independiente de la observación consciente, constituye un problema que invita a repensar la noción de medición cuántica. Con el fin de avanzar en la comprensión de lo que denominamos realidad, hay que rechazar el carácter antropocéntrico de la medición cuántica, para preguntarnos qué tipo de entidades y sistemas pueden actuar como agentes de medición. Defiendo en consecuencia la tesis según la cual los IGUS se pueden equiparar a los agentes de medición cuántica, lo cual fundamenta una perspectiva informacional contextualmente dependiente de los sistemas de interpretación y, por tanto, semiótica en el sentido de Peirce.

#### 4. LA INTERPRETACIÓN DE LOS “MUCHOS MUNDOS” DE LA REALIDAD CUÁNTICA

En contravía a la IC, la interpretación de los muchos mundos (MM) de Everett (1957) se pronunció a favor de la inexistencia de una frontera entre lo clásico y lo cuántico, al defender que toda la realidad es cuántica. El universo podría describirse por un vector de estado unitario<sup>14</sup> que representa una superposición inmensa que al irse subdividiendo va acomodando todas las alternativas consistentes con las condiciones iniciales. En esta interpretación el observador consciente de Bohr no es necesario, puesto que en un universo cuántico, los estados de superposición y coherencia serían permanentes. Más aún, el objeto medido, los dispositivos de medición y los observadores estarían también en superposición. En consecuencia cada vez que se da una interacción entre dos

---

<sup>14</sup> Un estado puro es un ensamble de sistemas cuánticos que puede ser descrito por un vector de estado único. Mientras que en un estado mixto, varios vectores de estado, no necesariamente ortogonales entre sí, son tomados como base. Un estado puro asociado a un sistema físico se representa por un vector unitario del espacio de Hilbert.

sistemas cuánticos la función de onda se divide, dando lugar a interferencias que provocan bifurcaciones permanentes. De este modo tendrían lugar infinitos eventos interferentes que generan una diversidad creciente de resultados cada uno de los cuales se ubica en alguna de las ramas que brotan con la evolución de la función de onda del universo. No existiendo reglas de selección, todas las ramas tienen probabilidades iguales de existir, ya que ninguna generaría un resultado definido “mejor” que las otras, y en consecuencia estaríamos viviendo en uno de los numerosos universos igualmente reales. De acuerdo a esta interpretación no hay observadores clásicos, ni medición propiamente tal, ni colapsos bruscos de la función de onda, sino interferencias entre sistemas cuánticos que se subdividen en innumerables mundos cuánticos y que, por tanto, deja sin explicar el mundo clásico al ignorarlo. El número de mundos estimados de acuerdo a la teoría de cuerdas sería del orden de  $10^{500}$ , un número exorbitante que hace que esta hipótesis sea inconcebible, toda vez que la existencia de siquiera uno solo de los universos paralelos es indemostrable (Kauffman 2008).

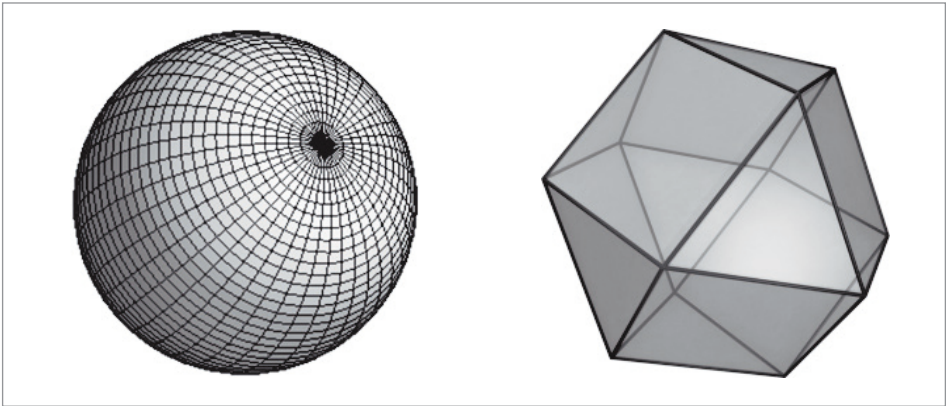
## **5. LA TEORÍA DE LA DECOHERENCIA O EL DARWINISMO CUÁNTICO**

Como un desarrollo de la IC que incorpora elementos de la interpretación de los MM, tendríamos el “darwinismo cuántico” de Zurek (DC), o teoría sobre la decoherencia por “selección inducida por el medio ambiente”, la cual reformula el problema de la observación y medición cuántica (Igamberdiev 2008).

En esta interpretación, la coherencia o superposición cuántica es un estado puro que contiene información sobre los estados de fase de todas las superposiciones existentes, la cual se afecta por un medio ambiente poblado principalmente de fotones y partículas que se mueven en todas las direcciones, borrando información de la gran mayoría de los estados en superposición y dejando sin alterar o, mejor, seleccionando un conjunto de estados punteros o preferidos. Estos estados punteros —representados como subespacios de Hilbert mutuamente ortogonales— son estables y constituyen el registro del resultado de las mediciones ejecutadas por el ambiente y, por consiguiente, serían los responsables de las propiedades clásicas. Es decir que las propiedades clásicas del mundo surgen espontáneamente por un proceso de pérdida de la superposición —decoherencia cuántica— a causa de la acción del medio ambiente que monitorea o mide permanente a los sistemas cuánticos. Tenemos entonces que a partir de un conjunto de estados virtuales pertenecientes a un sistema cuántico, solamente sobreviven los estados cuánticos preferidos o adaptados al entorno. En otras palabras, el entorno monitorea permanentemente ciertos observables del sistema cuántico y en lugar de provocar el colapso manifiesto

en un estado clásico discreto con valores propios, selecciona un conjunto de estados posibles, los realmente accesibles para su actualización. Estados que retienen correlaciones entre el sistema y el entorno.

Utilizando una imagen geométrica sugerida por Gould (2002) para ilustrar las diferencias entre la teorías gradualista darwiniana y la saltacionista, propongo que todos los estados en superposición se podrían representar por los puntos en la superficie de una esfera y por tanto infinitas variaciones mínimas en todas las direcciones estarían al alcance para una población, pero en las condiciones de un medio ambiente determinado la inmensa mayoría de las variaciones potencialmente accesibles se pierden y quedamos restringidos a un polihedro cuyas múltiples caras corresponden a los estados susceptibles de ser actualizados a nivel individual en un lugar y momento determinado (ver figura 2). La evolución sería algo así como lanzar el polihedro para definir al azar la cara en que cae, la cual define el promedio alrededor del cual fluctúan las variaciones realmente accesibles en la población, pero en el caso del DC a cada cara le corresponderían los estados pertenecientes a la base preferencial impuesta por el medio ambiente en la medición del sistema individual. En otras palabras, la evolución tendría lugar por el cambio en el ángulo de giro de los ejes ortogonales en el espacio de Hilbert por el efecto impredecible de la interacción del sistema cuántico con el medio ambiente.



**Figura 2.** Ilustración de las diferencias entre el gradualismo clásico darwiniano y el saltacionismo más a fin al darwinismo cuántico.

Los aparatos de medición de Bohr serían entonces, dispositivos contruidos por los humanos que, como parte del medio ambiente, provocan un colapso repentino de la función de onda en condiciones controladas de experimentación. Pero, a partir de esta situación tan específica no podemos inferir como conclusión general que en el mundo natural en ausencia de observadores cons-

cientes los procesos transcurran de la misma manera. Si la interacción con el medio ambiente conduce a un cambio macroscópico detectable en algún lugar, significa que la decoherencia ha tenido lugar y que, por tanto, el vector de estado original se ha reducido a uno de los valores propios pertinentes al proceso de interacción, es decir que la información acerca del estado del sistema ha dejado su huella en el medio ambiente entrelazándose con él. Así, para los estados propios del observable pertinente se pueden inferir correlaciones entre las propiedades cuánticas y las propiedades macroscópicas observables. De esta manera la ecuación de Schrödinger describiría no solamente las propiedades intrínsecas del sistema cuántico, sino también la evolución de los posibles efectos macroscópicos en el medio ambiente, incluyendo los aparatos de medida (Roederer 2012).

Por otra parte y en conexión con la termodinámica, los estados preferidos corresponderían a los estados de mínima entropía, mientras que la habilidad del entorno para eliminar superposiciones del sistema cuántico depende de su capacidad para incrementar su entropía (Zurek 2003; Zwolak, Quan, & Zurek 2009). Por otra parte, hay que tener en cuenta que la evolución darwiniana premia con el éxito reproductivo a los sistemas que poseen la habilidad de auto-constrañirse en estados de baja entropía, incrementado así la entropía disipada en el entorno. Es decir, que los sistemas cuánticos evolucionan mediante la interacción permanente con su entorno para ubicarse y acomodarse en estados estables de baja entropía a expensas del aumento de entropía en el entorno. En el caso de los seres vivos las restricciones internas mantienen estados de baja entropía que constituyen el fundamento de las adaptaciones.

## **6. ENTORNO Y SISTEMAS DE INTERPRETACIÓN**

Se discute en qué medida SCA (IGUS) semejantes generan una misma imagen de la realidad externa, puesto que en caso de no hacerlo se violaría el criterio de objetividad según el cual ante un mismo fenómeno, diferentes observadores deben percibir lo mismo. El DC pretende salvar grados de objetividad en contra de un relativismo subjetivista extremo. En efecto, Zurek (2009) consideró que si la información dispersa en el ambiente fuera redundante y se repitiera en muchas copias, SCA (IGUS) semejantes, terminarían por capturar la misma información llegando a un acuerdo colectivo sobre el mundo externo. En otras palabras, no habría objetividad, sino redundancia de la información disponible en el medio ambiente, puesto que predomina la información observable que proviene de un conjunto de “estados preferidos”, una vez que la mayoría de las superposiciones han sido eliminadas y no tienen posibilidad real de actualizarse en un

medio ambiente determinado. Por tanto, los “estados preferidos” en superposición dan lugar a los estados observados, mediante las mediciones ejecutadas por el entorno poblado por SCA (IGUS), entorno que a su vez contiene la huella, impresión o reflejo de los estados preferidos. De esta manera cuando se establece un encaje estructural y funcional o mejor un entrelazamiento entre los SCA y algún elemento del entorno, las propiedades de este último determinan el tipo de información potencial que pasa del sistema cuántico al medio ambiente (es decir que se actualiza).

De acuerdo a esta propuesta teórica la existencia de un mundo clásico solamente se puede explicar desde lo cuántico, la explicación del universo como una totalidad implicaría aceptar una mega-superposición cuántica compatible con la función de onda de Schrödinger, pero indescriptible dada la inexistencia de un observador externo que pueda medirla. Por el contrario, la perspectiva internalista sería realista, ya que explica la experiencia compartida que poseemos de un mundo clásico objetivo, sometido a leyes. Desde esta perspectiva el universo es una red de sistemas cuánticos abiertos (observadores y observados) que interactúan mediatizados por el ambiente y que, por lo tanto, están sujetos a la adopción de una mezcla de estados posibles permitidos por la selección inducida por el entorno.

En consecuencia, podemos considerar el entorno como todo lo que rodea a un sistema determinado, el cual contiene entidades pertenecientes a distintos niveles de organización y, por tanto, pertenecientes a categorías conceptuales diferentes, desde partículas dispersas en movimiento presumiblemente azaroso, bosones, fotones, electrones, quarks, protones, átomos, moléculas, virus, bacterias, células, organismos, comunidades bióticas, hongos, elefantes, selvas tropicales, humanos y sus productos tecnológicos como aparatos de medida, televisiones, automóviles, edificios, factorías, etc. Las entidades de menor escala predominan en el ambiente por factores de varios órdenes de magnitud, mientras que las de mayor escala son muchísimo menos abundantes. Es decir los niveles inferiores escalares son los que más contribuyen a la conformación del entorno y por esta razón pensar el entorno como un sistema envolvente de orden superior que impone restricciones a los componentes de los niveles inferiores, se explicaría por la eliminación de los estados posibles y la retención de los preferidos. De modo semejante, explicar la emergencia del mundo organizado a partir de la descripción de los componentes fundamentales, nos remite también a las partículas subatómicas que a medida que interactúan entre ellas se entrelazan y contribuyen a la conformación de su medio ambiente externo. Es decir las partículas subatómicas aparecen tanto en los extremos inferiores como superiores de las escalas jerár-



quicas de organización, o mejor en los ambientes internos entrelazados con los externos. Escarbar en los niveles últimos constitutivos de la materia nos lleva inevitablemente a enfrentarnos con las partículas cuya inmensa mayoría estaría entrelazada con otras en el medio ambiente. Por esta razón, resulta de mayor conveniencia definir los medios ambientes en relación al conjunto de los factores que son significativos para cada uno de los sistemas contenidos en ellos, porque corresponden al espacio de donde provienen los estímulos perceptibles, y además donde se proyecta la acción de estos mismos sistemas. Es decir, debemos intentar definir sub-ambientes locales en función de los factores relevantes para los sistemas y entidades en estudio. En otras palabras los “sistemas de interpretación (SCA o IGUS) pueden ser estudiados, investigando tanto los factores ambientales que inciden y provocan en ellos cambios de estado, como los efectos ambientales que ellos generan. De esta manera la física reencuentra la semiótica. 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. Es decir, no podemos conocer los SCA o IGUS directamente, sino a través del ambiente significativo en que ellos actúan.

En esta perspectiva los SCA (IGUS) estarían suspendidos en un estado intermedio entre lo cuántico (potencial e indeterminado) y lo clásico (actual y determinado), e interactuarían indirectamente con otros sistemas en un entorno del cual hacen parte constitutiva y que al actuar modifican, a la vez que se modifican a sí mismos. No hay por tanto lugar a la prevalencia del observador humano, de modo que los colapsos bruscos (grandes saltos) de la función de onda serían muy poco frecuentes, mientras que las transiciones discontinuas menos intensas (pequeños saltos) entre estados, serían mucho más frecuentes. En esta línea argumentativa un observador es todo sistema físico (cuántico-clásico) inmerso en un contexto medio ambiental que, de acuerdo a su organización interna, es capaz de detectar perturbaciones físicas cuánticas (fotones, electrones, sub-partículas, etc.) y clásicas (campos electromagnéticos, sustancias químicas, etc.), del entorno externo e interno, emitidas por otros sistemas, e interpretarlas como señales informativas que los guían en la subsiguiente adopción de restricciones internas y las acciones implementadas hacia el medio externo. En consecuencia a cada IGUS le corresponde una subregión del medio ambiente significativa para cada uno de ellos.

De acuerdo a McFadden<sup>15</sup> y siguiendo a Conrad (2001) las células actúan como agentes que miden la localización de los protones en las enzimas, utilizando como aparato de medida los correspondientes sustratos metabólicos. Para MacFadden (2000) las bacterias en condiciones de inanición por ayuno, poseen gran cantidad de partículas en superposición, pero en presencia de fuentes de energía las moléculas del sustrato actúan como dispositivo de medición cuántica, de modo que las células ejecutan mediciones de las partículas, forzándolas a tomar los valores reales propios del mundo clásico. Los entrelazamientos entre partículas en el interior de las células y su medio interno, hacen que las células sean altamente sensibles a toda clase de eventos cuánticos que tengan lugar en su interior. En consecuencia dentro de la célula no existiría una frontera definida, ni fija entre el dominio clásico y el cuántico, sino que se desplazaría hacia los niveles más inferiores, donde los estados de superposición estarían protegidos de las interacciones ambientales más externas. En conclusión, tendríamos que las células ejecutan mediciones cuánticas que miden sus estados internos, e influyen de esta manera su dinámica, escapando así del determinismo. La agencia de la célula se debe a que el medio ambiente la dota con un aparato de medición (en este caso el sustrato metabólico), el cual determina las propiedades que la célula puede medir. Las mediciones ejecutadas por las células inciden en la elección de ajustes estructurales internos.

De la discusión precedente se infiere que la frontera entre lo clásico y lo cuántico depende del grado de aislamiento y de la manera en que el sistema cuántico sea abordado para su medición. Por tanto, consideramos como clásicos a los sistemas macroscópicos dada la dificultad de aislarlos y medirlos sin perturbarlos. Así como se ha considerado al ADN como un sistema en superposición parcial y la célula, como el entorno que ejecuta mediciones, podríamos correr la frontera de manera que la célula sea pensada como un sistema en superposición que es medido por el medio ambiente externo. De hecho para Bordonaro y Ogryzko (2013) esta última situación resulta ser más interesante para abordar el problema de la adaptación biológica.

---

<sup>15</sup> "Life is a system that uses internal quantum measurement to capture low-entropy states that sustain the state of the system against thermodynamic decay" (McFadden 2000).

Se podría argüir que todos los sistemas cuánticos observadores compiten por la información procedente de otros sistemas cuánticos, pero el ambiente, en cuanto sumidero de información cuántica, capturaría mucha más información y con mayor rapidez debido a su gran tamaño, haciendo que la información confiable captada por los SCA (IGUS) quede restringida a los observables que previamente han sido monitoreados por dicho ambiente.

De esta manera el DC se involucra en el debate sobre los aspectos epistemológicos y ontológicos de la mecánica cuántica, como el estatus del mundo clásico y el papel de los sistemas observadores. Podríamos discutir que en consecuencia la teoría cuántica describe la situación más general y universal, mientras que la física clásica sería la aproximación más adecuada para tratar sistemas muy específicos, es decir sistemas macroscópicos que interactúan fuertemente con el medio ambiente. Así, la realidad clásica no se explicaría a partir de argumentos universales, sino que deviene una aproximación que emerge del modo como los sistemas observadores perciben el universo. La selección de estados preferidos por el entorno es la garantía de la confiabilidad de los registros con los observables (Zurek 1991, 1998a, 1998b; Tegmark 1999). Los estados estructurales del sistema observador constituyen el registro de información estable seleccionado por el entorno. Pero en un sistema observador no se actualizan al mismo tiempo distintos estados estructurales, dado que la superposición es información potencial, por ejemplo, a nivel individual una célula toti-potente puede tomar una vía de desarrollo u otra dependiendo del contexto bioquímico tisular. Así mismo, a nivel de poblaciones específicas, unas subpoblaciones podrían actualizar un estado y otras, otro dependiendo de las condiciones ecológicas.

Se sigue de estas discusiones que la distinción entre ser (lo ontológico) y conocer (lo epistemológico) pierde todo fundamento. Es decir no hay información sin interpretación por parte del sistema observador. En este punto de la discusión afirmo que los agentes observadores y el entorno conforman una unidad que se ha querido explicar desde la cuántica por el entrelazamiento. El vector de estado del sistema es real en la medida que es capaz de transmitir información a los vectores de estado del medio ambiente.

Lo que denominamos realidad es el resultado de la capacidad del sistema de imprimir copias de los estados de sus vectores ortogonales en el medio ambiente, combinado con la capacidad del medio ambiente de definir qué conjunto de los estados del vector ortogonal se expresaran en el sistema. La transmisión exitosa de información del sistema cuántico al medio ambiente, produce la impresión de la información del sistema en los estados del medio ambiente, de manera que solamente cuando los vectores de estado del medio ambiente son ortogonales se puede afirmar que el medio ambiente contiene un registro definido del sistema.

## 7. EL DARWINISMO CUÁNTICO Y SUS IMPLICACIONES PARA EL ESTUDIO DE LOS SCA

La discusión gira en torno a la hipótesis según la cual los SCA actúan como agentes que al interactuar entre ellos en el contexto de un medio ambiente local, provocan pérdidas parciales de la coherencia que conducen a una sucesión de afinamientos estructurales que dan lugar a la adaptación a su entorno local. A diferencia de la teoría de los MM de Everett, donde todos los mundos posibles coexistirían en superposición, los SCA que se manifiestan o actualizan en el medio ambiente se enfrentan a la competencia darwiniana que define la viabilidad de las formas actualizadas. En consecuencia no todos los mundos se siguen bifurcando indefinidamente y, por tanto, solamente los seleccionados favorablemente dejan descendencia modificada en las siguientes generaciones.

Existe una analogía profunda entre la selección de estados virtuales en superposición a nivel de sistemas cuánticos individuales y la selección darwiniana en una población de formas en el mundo real. No obstante hay que subrayar la diferencia entre estas dos situaciones, en el primer caso se trata de “competencia entre estados virtuales en superposición en sistemas cuánticos individuales” por su supervivencia y propagación como información actualizada, y en la segunda de “competencia al interior de una población de individuos clásicos” por recursos energéticos para transmitir su información a la descendencia. No obstante de acuerdo a Campbell (2010), el DC satisface los criterios del darwinismo universal establecidos entre otros por Dawkins (1976), Dennett (1995) y Blackmore (1995). 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 genéticas heredables, 3) supervivencia diferencial de la descendencia por razón de estas variaciones. Cualquier población que cumpla estos tres pasos, independientemente de cual sea su composición material evolucionara indefectiblemente hacia una mayor supervivencia y adaptación.

Para entender mejor la justeza de 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) 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 cada fracción del ambiente contiene apenas 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 el ambiente puede incorporar es limitada y por eso los estados “sucesores” deben competir para existir (actualizarse) o de lo contrario se pierden, incrementando la entropía del ambiente circundante. Es decir, que los medioambientes, entendidos como subregiones del universo, resultan ser disímiles, puesto que el estado cuántico inicial ha dejado huellas o mejor 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 contiene una parte de la información original.

No obstante, para que la evolución adaptativa tenga lugar no es suficiente con el algoritmo darwiniano de Dawkins, Dennet y Blackmore sino que se requiere que los sistemas adaptativos posean un “modelo interno” del efecto del medio ambiente sobre el sistema y del sistema sobre el medio ambiente (Campbell 2010), y esto es justamente lo que el modelo de Zurek proporciona. En otras palabras el vector de estado contiene toda la información concerniente a los estados posibles a los que el sistema cuántico puede acceder y evoluciona de acuerdo a la ecuación de Schrödinger cuyo operador hamiltoniano modela las interacciones entre el sistema y el medio ambiente. De este modo el “modelo interno” condensa información sobre los efectos internos del sistema, los efectos del sistema sobre el entorno y los efectos del entorno sobre el sistema, el cual se actualiza permanentemente, mediante la selección de los estados adaptados. De esta manera los SCA simulan las interacciones del sistema cuántico con el entorno y anticipan los resultados de su interacción con el ambiente, para elegir

los ajustes estructurales adaptados y las consiguientes acciones a implementar. En consecuencia la adaptación tiene una explicación semiótica puesto que la posesión de un “modelo interno” permite entender a los SCA o IGUS como “sistemas de interpretación” en el sentido de Peirce.

## 8. MÁS ALLÁ DE LOS MODELOS BIOLÓGICOS CLÁSICOS DE ADAPTACIÓN: NEO-DARWINISMO Y (NEO)-LAMARCKISMO

Hemos discutido como la teoría de la decoherencia inducida por el entorno, no define fronteras tajantes, claras y precisas entre los dominios clásico y cuántico (Zurek 2002, 2003). Pareciera entonces que ni el estado cuántico, ni el clásico se realizan completamente, sino que la realidad corresponde a estados intermedios ubicados entre estos extremos. Por tanto, el principio lógico del tercero excluido según el cual la realidad sería o completamente clásica o completamente cuántica no se cumple. El dominio cuántico potencial<sup>16</sup> siempre está en proceso inacabado de actualización y, por tanto, no se acomoda a este principio lógico, el cual se restringiría exclusivamente para el caso de entidades reales es decir actualizadas y discretas altamente determinadas. Lo genérico es potencial y lo específico actual. Por esta razón, la descripción de los sistemas vivientes requiere del uso simultáneo de los formalismos clásicos y cuánticos, estos últimos con diferentes bases preferidas de acuerdo a los observables examinados<sup>17</sup> (Rosen 1985 en Mikulecky 2001). Pero más que oponer el mundo clásico y el cuántico, lo más conveniente sería considerar para los objetos macroscópicos propiedades clásicas y cuánticas, así como no dudamos hacerlo con los fotones.

Kitto (2014) ha justificado la aplicación del formalismo de la cuántica a sistemas contextualizados, además que nociones como superposición, no localidad, entrelazamiento, etc., serían susceptibles de ser desarrolladas y precisadas una vez sean extrapoladas a la biología<sup>18</sup>.

---

16 “The probability wave of Bohr, Kramers, Slater (...) was a quantitative version of the old concept of “potentia” in Aristotelian philosophy. It introduced something standing in the middle between the idea of an event and the actual event, a strange kind of physical reality just in the middle between possibility and reality” (Heisenberg 2007).

17 “Complexity is the property of a real world system that is manifest in the inability of any one formalism being adequate to capture all its properties. It requires that we find distinctly different ways of interacting with systems. Distinctly different in the sense that when we make successful models, the formal systems needed to describe each distinct aspects are NOT derivable from each other.” (Mikulecky 2001).

18 “A living organism is a system. And entanglement, non-locality, non-separability, superposition, whatever these concepts may mean in biology, may present themselves both at each specific level of organization and in the interactions between levels of organization”, (Longo & Montévil 2011).

Recordemos que los sistemas cuánticos pasan de la superposición (información potencial) a un conjunto de estados preferidos, a partir de los cuales se decide la actualización de algunas formas. De este modo podemos justificar las bases físicas de la transformación al considerar que los sistemas biológicos siempre están en proceso de actualización y, por tanto, nunca se comportarían completamente como clásicos. En esta línea de argumentación la transformación y el cambio se conciben como el paso de la potencia al acto<sup>19</sup>, la primera se describe en términos compatibles con la mecánica cuántica y la termodinámica de sistemas lejos del equilibrio, y el segundo abordable desde la perspectiva clásica inspirada en la mecánico-estadística, para sistemas cercanos al equilibrio.

La existencia en el entorno de información de los sistemas y en ellos de información incorporada procedente del entorno, sería la clave para entender porque a medida que los sistemas interactúan y se reacomodan recíprocamente, la superposición y el entrelazamiento nunca desaparecen por completo. El entorno actúa reteniendo y favoreciendo la propagación de los estados virtuales preferidos, y destruyendo las superposiciones no adaptadas, convirtiéndose en el agente causal de la forma por cuanto actúa directamente sobre el potencial latente restringiéndolo a los estados realmente accesibles y susceptibles de ser actualizados. Más exactamente, la interacción entre sistema y entorno da lugar a superposiciones nunca completamente resueltas al interior de los SCA y, en ese sentido, el DC incorpora aspectos del modo lamarckiano de evolución. El ambiente es altamente heterogéneo y a lo largo del proceso evolutivo se modifica, conformando un tejido espacio temporal de relaciones en el que se desenvuelven las trayectorias evolutivas consistentes que han sido seleccionadas del conjunto de trayectorias posibles. El espacio-tiempo de relaciones está conformado por una red de sistemas observadores individualizados y exclusivos que no obstante comparten información con observadores diferentes, alcanzando un consenso cuasi-objetivo del mundo exterior.

Estas reflexiones sobre el papel del medio ambiente reeditan y actualizan las discusiones sobre la pertinencia de los enfoques sistémicos, considerando que proveen explicaciones favorables a la adaptación mucho más eficientes que el ciego “ensayo y error”. Por ejemplo, las investigaciones sobre la recolección o cosecha de fotones han mostrado que la alta eficiencia en el transporte de elec-

---

19 “One might perhaps call it an objective tendency or possibility, a “potentia” in the sense of Aristotelian philosophy. In fact, I believe that the language actually used by physicists when they speak about atomic events produces in their minds similar notions as the concept “potentia.” So the physicists have gradually become accustomed to considering the electronic orbits, etc., not as reality but rather as a kind of “potentia”. (Heisenberg 2007 154-155).

trones hacia los centros de absorción (FMO) de bacterias verdes del azufre se debe a la coherencia cuántica (Engel *et al.* 2007). Es como si las ondas cuánticas coherentes simultáneamente explorarían todas las opciones posibles, y automáticamente seleccionarían el camino más eficiente al centro de reacción. La mecánica cuántica explica como el medio ambiente impone restricciones a los sistemas, de modo que la exploración de configuraciones adaptativas es menos aleatoria y ciega de lo que cabría suponer desde un punto de vista neodarwinista, al incidir de acuerdo a Ogryzko (1997, 2009) en la aparición de mutaciones genéticas y modificaciones epigenéticas que optimizan la adaptación al medio.

Los dos modos de actuar del medio ambiente como factor en la generación de las variaciones y como filtro de las mismas, serían en realidad uno mismo, evitando continuar con la polarización que han caracterizado las discusiones entre (neo)-lamarckismo y neo-darwinismo respectivamente. Solo superando estos esquemas clásicos será posible explicar la adaptación biológica. El ajuste recíproco (estructural y funcional) del organismo con su medio ambiente se daría mediante el entrelazamiento de partículas cada una de las cuales ha sido detectada como señal significativa para cada uno de los sistemas adaptativos involucrados, hecho que invita a repensar al sistema y su ambiente como un sistema unificado.

Un marco teórico inspirado en la mecánica cuántica explicaría porque es imposible separar la generación del espectro de variantes poblacionales, de las condiciones de selección impuestas por el entorno. En otras palabras, la aparición de variantes no obedece a una ley determinista, ni tampoco se generan al azar antes de la exposición al medio ambiente donde la selección tiene lugar, sino que se generan de un modo indeterminado y contingente precisamente como consecuencia de la interacción de los organismos con dicho entorno. El (neo)-lamarckismo ha defendido la influencia directa del medio ambiente en la producción de las formas de vida, y la indirecta dada por el uso y desuso en respuesta a dicho medio, hecho que concuerda con la idea, según la cual el morfo-espacio de lo posible se circunscribe a los “estados preferidos”. La topología del morfo-espacio de lo realmente posible o accesible, presentaría zonas muy definidas de modo discontinuo, donde se aglutinarían las formas posibles, mientras que la inmensa mayoría del espacio quedaría vacío. Teniendo en cuenta que la actualización de las formas ocurre en la interacción de los organismos con su medio ambiente a lo largo del desarrollo ontogenético a nivel individual y filogenéticamente a nivel poblacional, el morfo-espacio de lo posible iría cambiando en la distribución de las zonas de aglomeración permitidas a medida que el medio ambiente cambia.



De todas las formas actualizadas la SN retiene y favorece unas, y elimina otras en la lucha y competencia por los recursos y, en consecuencia, se genera la correspondiente distribución estadística de las formas realmente existentes.

Esta discusión rehabilita en parte la propuesta de Lamarck (1802) de que la organización biológica primaria obedece a procesos físico-químicos. Así mismo D'Arcy Thompson (1942 7-8, 12) ha mostrado como los procesos físicos definen los patrones de organización. Pero a diferencia de Lamarck, para quien las fuerzas físicas actuaban de un modo cuasi determinista, hoy en día se considera que en condiciones de alejamiento del equilibrio termodinámico y en estados de superposición cuántica se posibilitan una diversidad de patrones estructurales en las condiciones de un medio determinado. Esta idea también aparece en Wright (ver Dobzhansky 1951 10) y fue retomada por Kauffman (1993), en el sentido de que las formas existentes se agrupan de manera heterogénea en un espacio morfo-genético o paisaje adaptativo de múltiples picos, en grupos claramente diferenciados y sin formar un continuo isotrópico que supondría cambios graduales en todas las direcciones. En el caso de los paisajes adaptativos de Wright y Kauffman, la distribución aleatoria de los picos adaptativos obedece a factores estructurales derivados de la conectividad génica mostrando que actúan restricciones estructurales que impiden que ciertas configuraciones se presenten. Tal como lo ha descrito Alberch (1982) las restricciones al desarrollo dan lugar a una distribución discontinua del morfo-espacio realmente ocupado por las formas existentes. Igualmente muchos autores coinciden en señalar que las formas actualizadas se agrupan en picos adaptativos no necesariamente contiguos (Endler 1986; Raff 1996; Arthur 2000; Andrade 2009b). Es decir que a muchos genotipos les corresponde un único fenotipo, dada la gran cantidad de variación neutra posible. Por esta razón aunque la variación genotípica fuera gradual y continua, la variación fenotípica es discreta y discontinua toda vez que entre ellas se mantienen umbrales de estabilidad termodinámica y a cada una corresponden actualizaciones de los estados preferidos para una determinada condición ambiental.

Las discusiones actuales señalan que la evolución no se agota con el esquema neo-darwiniano de mutaciones aleatorias a nivel genético, sino también hay que incluir procesos (neo)-lamarckianos como la generación de variantes fenotípicas debida a la interacción entre los SCA y el medio ambiente. Podemos afirmar que la teoría de la evolución por SN explica adecuadamente el filtrado de formas actualizadas o manifiestas en una población de acuerdo a su eficacia en un medio ambiente dado, pero esta misma teoría se queda corta para explicar el origen del potencial auto-organizativo a partir del cual surgen

las formas que se actualizan. En este sentido hablar de darwinismo cuántico puede ser un término equivoco, en cuanto se ha asociado el darwinismo con una explicación basada en la generación (actualización) de las formas variantes al azar, ignorando que las formas surgen en la interacción entre los SCA (IGUS) —situados entre lo cuántico y lo clásico— y el medio ambiente. El hecho de que la actualización de las formas posibles, aunque indeterminada no sea independiente del medio ambiente, ni completamente aleatoria reivindica aspectos del modo (neo)-lamarckiano de evolución<sup>20</sup>.

Peirce ( 615 - 751) había anticipado esta situación al anunciar que la universalización del darwinismo era inevitable, siempre y cuando se mantuviera un principio de variación semejante al habito lamarckiano (Andrade 2014b). La explicación de la evolución de los SCA (IGUS) exige la utilización de nociones algo imprecisas como superposición, medición cuántica, entrelazamiento, información potencial, información actualizada, interacción, etc., cuya precisión va a significar una modificación del legado neo-darwiniano, mediante su fusión con un (neo)-lamarckismo renovado, donde la SN se concebirá como subsidiaria de una diversidad de factores, pero nunca como el factor predominante de la evolución.

Desde la perspectiva neo-darwiniana se podría afirmar que la SN favorece a los SCA (IGUS) que aciertan al azar, pero en realidad se trata de sistemas que eligen sus ajustes estructurales y comportamientos con la información parcial que han logrado captar e interpretar procedente del entorno. En la naturaleza física y biológica hay contextos de interacción dado que los SCA (IGUS) actuando como sistemas de interpretación o agentes de medición que escogen el ajuste estructural de acuerdo a como se perciben ellos mismos en relación a su entorno o mundo significativo. No hay determinismo en estas elecciones puesto que en cada caso hay más de una alternativa accesible o más de un estado virtual preferido que pueda ser actualizado. Tratándose de la generación y preservación de linajes evolutivos o trayectorias de vida con reducción parcial de la superposición y coherencia cuántica, podemos inferir que la evolución adaptativa tiene lugar porque los SCA anticipan una trayectoria funcional y congruente con el medio, de entre las muchas posibles, en el contexto de las interacciones o mediciones efectuadas por una población de observadores no-equivalentes (Igamberdiev 2008). En consecuencia, la explicación física de los sistemas vivientes quedaría enmarcada dentro de

---

20 “Because developmental mechanisms exhibit, variously, nonlinear, plastic and self-organizational properties, evolutionary transitions can be “saltational” (i.e., phenotypically abrupt), rapid, and influenced by environmental change in a direct (i.e., Lamarckian) fashion and not just as a consequence of selection of marginally favorable variants”, (Newman 2009).

una interpretación semiótica ya que es imposible dejar de concebir a los SCA como agentes que detectan selectivamente en el medio ambiente perturbaciones físicas o señales procedentes de otros sistemas, las cuales interpretan generando mundos de significación que se expresan en adaptaciones funcionales en un entorno determinado.

## 9. LA INFORMACIÓN COMO INTERPRETACIÓN

Para concluir propongo que la noción de información no se circunscribe al dominio de lo epistemológico, sino que se refiere a una realidad ontológica, es decir se refiere a la actividad intrínseca de los SCA (IGUS) que tienden a la actualización de un potencial. La auto-organización de la materia-energía opera de acuerdo a procesos físicos —termodinámicos y cuánticos— que incluyen como hecho real la interpretación, de perturbaciones físicas (señales informativas) o factores que convergen contingentemente en un momento y lugar determinados, los cuales orientan la adopción de constricciones internas y la elección de las acciones a implementar sobre el entorno. Entender el potencial evolutivo, de acuerdo a la termodinámica de sistemas abiertos lejos del equilibrio y a la mecánica cuántica conduce a incorporar la historicidad, sin violar ninguna ley física, de manera que las interacciones establecidas en el devenir histórico aparecen como un factor decisivo en la actualización de las formas existentes. Es decir reconocer que el universo actuando bajo las mismas leyes, hubiera podido ser diferente al que conocemos y en el que vivimos. Según Kauffman (2000, 2008) la información es la propagación de la organización o la actualización de la forma cuando se presentan impedimentos o restricciones a una materia amorfa e isotrópica en expansión. Pero de todas las formas imaginables existe un número muy reducido correspondientes a los estados preferidos de Zurek, las cuales definen las que en efecto son realmente posibles y accesibles en un momento determinado de la historia de la vida. El conjunto de formas alcanzables en una generación tiende a crecer con el aumento de la diversidad de formas realmente existentes. Es decir el potencial informativo se incrementa a lo largo de la evolución.

Desde la mirada de los físicos sería deseable poder estimar parámetros estadísticos confiables de los estados característicos de los SCA (IGUS), aunque esto supondría aislarlos idealmente de perturbaciones externas para poder definir con precisión las condiciones iniciales y el espacio de todas las alternativas o permutaciones realmente existentes. Sin embargo, como explica Kauffman (2008) es imposible hacer con antelación un listado de todas las maneras en que por ejemplo una misma secuencia de ADN o un mismo órgano puedan

ser utilizados en una población de organismos, ya que depende de las circunstancias medio ambientales en que estén expuestos. Por esta razón se asume que es imposible anticipar el valor que tendrían ciertos parámetros medibles, dado que en la interacción de los SCA con el medio local se generan modificaciones impredecibles, justamente para mantener el encaje funcional entre el sistema viviente y el medio ambiente. En este sentido, un marco de interpretación semiótico mostraría en qué medida la física, sin renunciar a la vigencia de sus leyes, se acomoda a una explicación histórica donde la contingencia debida a la confluencia espacio-temporal de una gran cantidad de factores tanto internos como externos, define el curso impredecible de la evolución. Las leyes físicas definen el ámbito de lo posible y la contingencia histórica, sin violarlas, explica el mundo de las formas actualizadas (manifiestas en el mundo real) que sin embargo no es sino una ínfima fracción dentro de los muchos mundos posibles. Sotolongo y Delgado (2006), Ulanowicz (2009a), Gabora *et al.* (2013) independientemente justifican la prevalencia de la semiosis sobre la causalidad física cuando la combinatoria de posibilidades futuras realmente accesibles sobrepasa la capacidad de las leyes universales para determinar los resultados. En este sentido la explicación física (termodinámica y cuántica) no entra en conflicto radical con la explicación histórica y contingente adoptada previamente por el darwinismo.

Las leyes universales definen el ámbito de lo posible, pero las contingencias históricas definen qué formas se actualizan y de este modo tejen la trama de la vida. En otras palabras los SCA (IGUS) poseen un potencial inconmensurable para cambiar de formas diversas, y el cambio que en efecto tenga lugar, depende del contexto de interacciones. Es decir, existe una complementariedad entre la potencialidad y la dependencia del contexto medio ambiental, puesto que la actualización de este potencial depende de la interacción entre los sistemas y su medio circundante. La semiosis explicaría como esta transición está asociada a la interpretación de las perturbaciones físicas, por parte de los sistemas interactuantes, como señales informativas es decir conducentes a la definición de arreglos estructurales internos y de las acciones que estos proyectan al exterior.

Para terminar quisiera decir que hoy en día la ciencia está muy cerca de aceptar instancias de interpretación efectuada por agentes de medición interna, en diferentes escalas de organización de la naturaleza, incluyendo niveles celulares y sub-celulares como virus, priones y otras entidades macromoleculares. En el terreno filosófico y de mayor interés para los defensores de una filosofía natural, estamos comenzando a caer en cuenta de la existencia de unos principios generales, que aunque descubiertos en los seres vivos, operan también

a escala del universo en su conjunto<sup>21</sup>. Se trata del reconocimiento explícito de una analogía profunda entre lo físico y lo biológico que sin duda tendrá consecuencias profundas en el modo de comprender y actuar, en el mundo que nos hizo posibles.

## TRABAJOS CITADOS

Alberch, P. “Developmental constraints in evolutionary processes”, en John Tayler Bonner (ed.), *Evolution and Development*, Berlín: Springer-Verlag. (1982): 313-332.

Andrade, E. “From external to internal measurement: a form theory approach to evolution”. *Biosystems*, 57. 2 (2000): 49-62.

Andrade, E. *Los demonios de Darwin. Semiótica y Termodinámica de la Evolución Biológica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2003.

\_\_\_\_\_. “On Maxwell’s demons and the origin of evolutionary variations: an internalist perspective”. *Acta Biotheoretica*. 52 (2004): 17–40.

\_\_\_\_\_. “Darwin o el falso conflicto entre la teoría de la selección natural y la hipótesis de la pangénesis”. *Acta biol. Colomb.* 14 (2009a): 63 – 76.

\_\_\_\_\_. *La ontogenia del pensamiento evolutivo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia- Colección Obra Selecta, 2009.

\_\_\_\_\_. “Integration of Thermodynamic, Quantum and Hierarchical Theories of Information within the Context of Peircean Semiosis”. *BioSystems*. 120. (2014a): 10-20.

\_\_\_\_\_. “La vigencia de la metafísica evolucionista de Peirce”. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*. Vol. 14. 28 (2014b): 83-121.

Anway, Matthew D., Andrea S. Cupp, Mehmet Uzumcu, & Michael K. Skinner. “Epigenetic transgenerational actions of endocrine disruptors and male fertility”. *Science* 308 (2005): 1466–1469.

Arai, J., Li, S., Hartley, D.M., y L.A. Feigl. “Transgenerational rescue of a genetic defect in long-term potentiation and memory formation by juvenile enrichment”. *J. Neurosci.* 29 (2009): 1496-1502

---

21 “The evident fact that organisms make measurements does not mean that they operate on the basis of a principle different from that controlling the time development of the universe; it means that the universe operates on the basis of a principle that is expressed in a more evident way in the realm of biological organisms”. (Conrad 2001 ).

- Arthur, W. "The concept of developmental reprogramming and the quest for an inclusive theory of evolutionary mechanisms". *Evolution and Development*. 2. 1 (2000): 49-57.
- Bateson, G. *Pasos hacia una Ecología de la mente*. Ed. Carlos Lohlé. Buenos Aires: Lúmen, (1976).
- Binder, P y Danchin, A. "Life's demons: information and order in biology". *Embo Reports*. 12. 6 (2011): 495-499.
- Blackmore, S. *The Meme Machine*. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- Bordonaro, M. y Ogryzko, V. "Quantum Biology at the Cellular Level". *Elements of the research program*. (2013): 1304.0683 [q-bio.OT].
- Brooks, D. & Wiley, E.O. *Evolution as Entropy*. Chicago: University of Chicago Press, 1988.
- Campbell, J. "Quantum Darwinism as a Darwinian process". *Cornell University Library*. arXv:1001.0745v1. Cornell University Library. 5 January 2010. Press.
- Conrad, M. "Unity of measurement and motion". *BioSystems*. 60 (2001): 23-38.
- Chalmers, D. J., & F. Jackson. "Conceptual Analysis and Reductive Explanation". *Philosophical Review*. 110 (2001): 315-61.
- Darwin, D. *The Origin of Species by means of Natural selection or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. Londres: ElecBook London edition based on the First Edition published by John Murray, 1859.
- \_\_\_\_\_. *Animals and Plants Under Domestication*. Londres: John Murray, Albemarle street, 1868.
- Dawkins, R. *The Selfish Gene*. Oxford: Oxford University Press.
- Dennet, D. *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*. New York: Simon and Schuster; Londres: Allen Lane, 1995.
- Dobzhansky, T. G. *Genetics and the origin of species*. 3rd ed. New York: Columbia University Press, 1951.
- Endler, John. *Natural Selection in the Wild*. Princeton: Princeton University Press, 1986.
- Engel, G.S., Calhoun, T.R., Read, E.L., Ahn, T.K., Mancal T, Cheng, Y.C., Blankenship, R.E., Fleming, G.R. "Evidence for wavelike energy transfer

- through quantum coherence in photosynthetic systems”. *Nature* 446 (2007): 782-786.
- Everett, H. “Relative State’ Formulation of Quantum Mechanics”. *Reviews of Modern Physics*. 29 (1957): 454–462.
- Gabora, L., Scott, E.O. & Kauffman, S. “A quantum model of exaptation: Incorporating potentiality into evolutionary theory”. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 113 (2013): 108 -116.
- Gould, S.J. *The Structure of Evolutionary Theory*. Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press, 2002.
- Heisenberg, W. *Physics and Philosophy*. Harper Perennial Modern Classics edition, 2007.
- Hoffmeyer, J. *Signs of Meaning in the Universe*. Indiana: University Press, 1996.
- Igamberdiev, A.U. “Living systems are dynamically stable by computing themselves at the quantum level”. *Entropy* 5 (2003): 76–87.
- \_\_\_\_\_. “Quantum computation, non-demolition measurements, and reflective control in living systems”. *BioSystems*. 77 (2004): 47–56.
- \_\_\_\_\_. “The computation power of living systems is maintained by decoherence-free internal quantum states”. In: *FIS Third Conference on the Foundations of Information Science*. Paris, 4–7 July 2005.
- \_\_\_\_\_. “Objective patterns in the evolving network of non-equivalent observers”. *BioSystems*. 92 (2008): 122–131.
- Kauffman, S. *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press, 1993.
- \_\_\_\_\_. *Investigations*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- \_\_\_\_\_. *Reinventing the Sacred. A New View of Science, Reason, and Religion*. New York: Basic Books, 2008.
- Kitto, K. A “Contextualised General Systems Theory Systems”. *Queensland University of Tecnology*. 18 september 2014. 2 541-565
- Longo, G. & Montévil, M. “From physics to biology by extending criticality and symmetry breakings”. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 106 (2011): 340-347.
- McFadden, J. *Quantum Evolution: Life in the Multiverse*. Harper Collins. McFadden, J. 2000.

- Mcfadden, J. & Al-Khalili, J. "A quantum mechanical model of adaptive mutation". *BioSystems*. 50 (1999): 203-211.
- Matsuno, K. *Internal measurement*. In: *Protobiology: Physical Basis of Biology*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1989.
- \_\_\_\_\_. "Forming and maintaining a heat engine for quantum biology". *BioSystems*. 85. 1 (2006): 23–29.
- \_\_\_\_\_. "Internalist stance and the physics of information". *BioSystems*. 38. 2–3 (1996): 111–118.
- Maxwell, J.C. *Escritos científicos*. Barcelona: Círculo de Lectores. 1999.
- Mikulecky, D. "The emergence of complexity: science coming of age or science growing old?" *Computers & Chemistry*. 25. 4 (2001): 341–348.
- Newman, S. *Evolution is not Mainly a Matter of Genes*. New York Medical College: The 200th anniversary of Charles Darwin, 2009.
- Ogryzko, V. "A quantum-theoretical approach to the phenomenon of directed mutations in bacteria (hypothesis)". *Biosystems*. 43 (1997): 83-95.
- \_\_\_\_\_. "On two quantum approaches to adaptive mutations in bacteria". *NeuroQuantology*. 7. 4 (2009).
- Pattee, H. "Evolving self-reference: matter, symbols, and semantic closure". En Rocha, L. (ed.). *Communication and cognition- artificial intelligence (Special issue Self-reference in biological and cognitive systems)*. 12. 1-2 (1995): 9-27.
- Peirce, C. S. "La Arquitectura de las Teorías". *The Monist*. Marinés Bayas. I (1891): 161-76; incluido en: CP 6. 7-34.
- \_\_\_\_\_. En: Hartshorne, C., Weiss, P., Burks, A.W. "Collected Papers of Charles Sanders Peirce". *Harvard University Press, Cambridge, MA*. (1931–1958):
- Raff, R.A. *The Shape of Life: Genes, Development, and the Evolution of Animal Form*. Chicago: University of Chicago Press, 1996.
- Roederer, J.G. "The Role of Pragmatic Information in Quantum Mechanics and the Quantum-Classical Transition" University Cornell Library. arXiv:1108.0991v2. 28 Jul 2012.
- Rosen, R. *Essays on Life Itself. (Complexity in ecological systems series)*. New York: Columbia University Press, 2000.
- Salthe, S. *Development and Evolution. Complexity and Change in Biology*. Cambridge: A Bradford Book. The MIT Press, 1993.



- \_\_\_\_\_. “The Spontaneous Origin of New Levels in a Scalar Hierarchy”. *Entropy*. 6 (2004): 327-343.
- \_\_\_\_\_. “The development (and evolution) of the universe”. *Foundations of Science*. (2010): 15: 357-367.
- Sotolongo, P & Delgado, C.J. *La revolución contemporánea del saber y la complejidad social. Hacia unas ciencias sociales de nuevo tipo*. Buenos Aires: Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales, 2006.
- Tegmark, M. "The importance of quantum decoherence in brain processes." *Phys. Rev.E.. arxiv.org/abs/quant-ph/9907009*. Cornell University Library. 10 november 1999.
- Zurek, W.H. “Decoherence and the transition from quantum to classical”. *Phys.* (1991): 36–44.
- \_\_\_\_\_. “Algorithmic randomness and physical entropy”. *Physical Review A*. 40. 8 (1989a): 4731 - 4751.
- \_\_\_\_\_. “Thermodynamic cost of the computation, algorithmic complexity and the information metric”. *Nature*. 341 (1989b): 119-124.
- \_\_\_\_\_. “Decoherence and the Transition from Quantum to Classical—Revisited”. *Los Alamos Science*. 27 (2002): 1-25.
- \_\_\_\_\_. “Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical”. *Reviews of Modern Physics*. 75 (2003): 715-775.
- \_\_\_\_\_. “Quantum Darwinism”. *Cornell University Library*. arXiv:0903.5082. 29 Mar 2009.
- Zwolak, M., Quan, H. T. & Zurek, W.H. “Quantum Darwinism in a Mixed Environment”. *Physical Review Letters*. 103.110402. American Physical Society. 8 september 2009.