

**LA OBRA DE STUART KAUFFMAN. APORTACIONES A LA
BIOLOGÍA DEL SIGLO XXI E IMPLICACIONES FILOSÓFICAS**

**INVESTIGACIÓN REALIZADA POR: ALFREDO PÉREZ MARTÍNEZ
DIRECTOR DE LA INVESTIGACIÓN: DR. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ RECIO
PROGRAMA DE DOCTORADO: ENTRE CIENCIA Y FILOSOFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

MAYO 2005

INTRODUCCIÓN

Capítulo 1: La obra de Kauffman y su contexto

- 1.1 Antecedentes biográficos.
- 1.2 Contexto histórico en el que se desarrolla su investigación.

Capítulo 2: Principales aportaciones de Kauffman a la biología del siglo XXI

- 2.1 Planteamiento central del proyecto Kauffmaniano.
 - 2.1.1 Las teorías de la complejidad: la auto-organización.
 - 2.1.2 Auto-organización y selección.
 - 2.1.3 La ruta hacia el orden.
- 2.2 Aportaciones a las teorías de la vida.
 - 2.2.1 Teorías modernas del origen de la vida.
 - 2.2.2 Kauffman y el origen de la vida.
 - 2.2.3 La teoría de los conjuntos auto-catalíticos.
- 2.3 Aportaciones a la teoría de la evolución.
 - 2.3.1 Redes booleanas.
 - 2.3.2 Evolución en el límite del caos.
 - 2.3.3 Selección, auto-organización y paisajes de ajuste (modelos NK y NKC).
- 2.4 Aportaciones a la teoría de la complejidad.

Capítulo 3: Implicaciones filosóficas de la obra de Kauffman

- 3.1 El emergentismo y su continuación en la obra de Kauffman.
 - 3.1.1 John Stuart Mill
 - 3.1.2 Samuel Alexander
 - 3.1.3 Conwey Loyd Morgan
 - 3.1.4 D.C. Broad
 - 3.1.5 El emergentismo inglés y sus detractores en la primera mitad del siglo XX
 - 3.1.6 El neo-emergentismo
 - 3.1.6.1 Emergentismo y micro-determinismo
 - 3.1.6.2 Emergentismo y macro-determinismo
 - 3.1.6.3 El emergentismo y su clasificación
 - 3.1.7 El neo-emergentismo del proyecto Kauffmaniano
- 3.2 El alcance ontológico del proyecto.
- 3.3 El alcance epistemológico del proyecto.
- 3.4 El proyecto Kauffmaniano: ¿un cambio de paradigma para la Biología y sus raíces filosóficas.
- 3.5 Entre ciencia y filosofía: la relación entre la ciencia física y la ciencia biológica.

Conclusiones: un nuevo horizonte para el estudio de la Biología: la complejidad y la auto-organización en el Siglo XXI

Apéndices.

1. Teorías de la complejidad y el caos
2. Wimsat y el problema de la agregatividad

Bibliografía.

“Cuando los pedantes nos invitaron a observar de qué fría mecánica los acontecimientos debían dimanar, nuestras almas dijeron en la sombra: Tal vez sí, pero hay otras cosas....”

Prólogo a *El Napoleón de Notting Hill*
Chesterton, 1898

Introducción

A partir de los años sesenta del pasado siglo, se ha ido incrementando, cada vez con mayor intensidad, el estudio de los sistemas dinámicos no-lineales, conocidos, también, como sistemas dinámicos complejos, sistemas adaptativos complejos, o sistemas caóticos. Se ha encontrado que, a diferencia de otros sistemas completamente aleatorios (las turbulencias, por ejemplo), éstos muestran patrones identificables de comportamiento, aunque, cabe señalar, son impredecibles en el largo plazo. El principal objetivo en el estudio de dichos sistemas no es la predicción de sus estados futuros, ya que la extrema sensibilidad a las condiciones iniciales hace imposible a medio y largo plazo cualquier anticipación. Por ello, la meta principal es identificar los patrones de comportamiento de los sistemas, esto es, describir bajo qué tipo de interacciones se desarrollan algunos comportamientos y emergen otros completamente nuevos e irreducibles a sus componentes originales. En otras palabras, la finalidad no es la predicción sino la descripción de los sistemas.

El impacto del estudio de tales sistemas, en el ámbito filosófico y científico hacia finales del siglo XX y comienzos del XXI, ha sido objeto de un gran debate (Hayles, 1998). Por una parte, hay quienes afirman que: “es un hecho que, tres siglos después de Newton, la ciencia experimenta un cambio radical de perspectiva” [Prigogine 1997, pp. 181]; “[...] reconocer la complejidad, hallar los instrumentos para describirla, y efectuar una relectura dentro de este nuevo contexto de las relaciones cambiantes del hombre con la naturaleza, son los problemas cruciales de nuestra época” [Prigogine 1997, pp. 48]”. Prigogine sugiere que la naturaleza del universo es de carácter complejo y que las aproximaciones deterministas, mecanicistas y reduccionistas, propias de la ciencia clásica, son insuficientes para describir este tipo de naturaleza; al mismo tiempo, sugiere que una nueva ciencia basada en los principios de la complejidad y el caos nos ayudará a conseguir tal descripción. Por otra parte, hay quienes sostienen que se ha sobreestimado el impacto de las llamadas teorías de la complejidad y el caos: “se sobreestima porque la teoría del caos no se opone a la ciencia normal: es ciencia normal. Sigue el mismo procedimiento que cualquier otra disciplina científica para acreditar a sus miembros, diseñar protocolos de investigación

y evaluar resultados. Al igual que otros enfoques, cree que las explicaciones económicas y unificadas son mejores que las múltiples. El nombre que Mitchell Feigenbaum dio a su descubrimiento de que los sistemas disipativos no-lineales siguen un camino predecible hacia el caos indica lo lejos que se encuentran las ciencias del caos de criticar el universalismo dentro de las humanidades: tal descubrimiento fue llamado teoría de la universalidad” [Hayles 1998, pp. 36].

Las opiniones se dividen en ambos sentidos, pero existe un amplio y general acuerdo en cuanto a que existe algo “verdaderamente importante” en esas nuevas aproximaciones llamadas *teorías de la complejidad*, pero, ¿qué es eso “verdaderamente importante”? Algunos de los análisis que se han hecho al respecto han pretendido evaluar una teoría de la complejidad o del caos a partir de un planteamiento muy general, su conclusión es que no existe una teoría como tal y, por consiguiente, que no hay avance alguno. Este tipo de análisis muestra distintas deficiencias: 1) no logra concretar el objeto de estudio; 2) los estudios desarrollados son dispersos; y 3) las conclusiones resultan demasiado generales. Además de tales dificultades metodológicas, se parte de un supuesto erróneo: se cree que se ha desarrollado una teoría de la complejidad, la cual, posteriormente, es aplicada en distintos campos del conocimiento para explicar ciertos fenómenos.

El avance en el estudio de los sistemas dinámicos complejos se ha dado a partir de problemas concretos en disciplinas concretas, por ello, cuando se habla de *teorías de la complejidad*, a lo que se hace referencia es a una diversidad de enfoques que abordan diversos problemas concernientes a la descripción de los sistemas dinámicos complejos bajo estudio. Quien pretenda responder por qué existe algo “verdaderamente importante” en las teorías de la complejidad debe asumir un enfoque inverso y mucho más restringido, esto es, debe partir de un problema concreto y una línea de investigación concreta. La presente investigación sigue ese camino. Se analizará, por una parte, el trabajo y las contribuciones que Stuart Kauffman, uno de los más importantes biólogos teóricos de nuestro tiempo, en sus últimos 35 años de investigación, ha hecho a la biología del siglo XXI, y, por otra, las implicaciones que éstas tienen en el ámbito filosófico. De esta manera, partiendo del problema del origen y evolución de la vida, según es abordado en la obra de Stuart

Kauffman, se intentará después un estudio de los sistemas dinámicos complejos de un modo muy concreto.

Stuart Kauffman cuenta con una formación multidisciplinar: filosofía, psicología, física, y biología. Hacia finales de la década de los sesenta comenzó a investigar tanto el problema del origen de la vida como el de la ontogénesis, pero de una forma que no correspondía a la tradicional, tanto en sus métodos como en sus preguntas: “Kauffman no es fácil. Sus modelos son rigurosos, matemáticos y, para muchos de sus colegas, algo difíciles de comprender” [Brockman 2000, pp. 296]; “¿puede el vasto orden observado en el desarrollo, de una manera comprensible, surgir como una propiedad espontánea, auto-organizada, de los sistemas genéticos complejos?” [Kauffman 1991, pp. 300]. Kauffman es uno de los científicos más importantes en el estudio de los procesos de organización biológica, y es pionero en el estudio de la auto-organización de los sistemas vivientes. En palabras de Varela (otro biólogo de vanguardia): “Stuart es una de las personas más competentes cuando se trata de redes biológicas moleculares” [Varela 2000, pp. 323]. Sus investigaciones tienen un impacto directo y contundente sobre el paradigma neo-darwinista vigente. Sus trabajos son de suma importancia para entender lo que puede llegar a ser la “nueva síntesis” biológica del siglo XXI: la síntesis entre los principios de auto-organización y selección natural.

Siguiendo a Brockman, podemos afirmar que en los días de Darwin no se conocía el mecanismo exacto de la herencia de los caracteres; el propio Darwin pensaba que un organismo podía adquirir ciertos rasgos como resultado de un cambio ambiental y transferirlos a su descendencia, una idea popularizada por el naturalista francés Jean-Baptiste Lamarck. En 1900, la labor realizada por Mendel unos cincuenta años atrás vio la luz y el gen, aunque su naturaleza exacta no se conocía en la época, se convirtió en uno de los actores principales dentro de “la síntesis moderna” de Mendel y Darwin. Esta síntesis, que reconciliaba la genética pura con la visión darwinista de la selección natural, la llevaron a cabo R.A. Fisher, J.B.S. Haldane y Sewall Wright a principios de los años treinta, cuyos trabajos fueron ampliados unos años más tarde por el paleontólogo George Gaylord Simpson, el biólogo Ernst Mayr y el genetista Theodosius Dobzhansky [Brockman 2000, pp. 29].

Esta síntesis moderna, conocida también como “el paradigma neo-darwinista”, siguiendo a Margullis [2000, pp. 124], sostiene que: “la variación tiene su origen en la mutación aleatoria; definiendo la mutación como cualquier cambio genético. Por aleatoriedad se entiende que los caracteres aparecen en la descendencia al azar con respecto a la selección: si una especie animal necesita una cola, no la desarrolla porque la necesita, sino que más bien se produce toda suerte de cambios al azar y los individuos provistos de cola sobreviven para producir más descendencia. Las variantes hereditarias surgen espontáneamente, sin que esto tenga nada que ver con que sean buenas o malas para el organismo en cuestión. La mutación es la fuente de variación sobre la cual actúa la selección natural”. Numerosos experimentos han puesto de manifiesto que si las moscas de la fruta son expuestas a mutágenos como los rayos X o determinadas sustancias químicas, lo que se obtiene son moscas enfermas o muertas, pero no aparece ninguna nueva especie de mosca –esta es la auténtica dificultad-. Todo el mundo está de acuerdo en que tales mutágenos producen una variación heredable. Todo el mundo está de acuerdo en que la selección natural actúa sobre esta variación. La cuestión es de dónde procede la variación útil sobre la que actúa la selección [Margullis 2000, pp. 124]. Este es el problema que Kauffman pretende resolver. Por otra parte, en torno al problema del origen de la vida, una de las corrientes dominantes sostiene que no pudo haber vida sino hasta que hubo un sistema genético primitivo, y que tal sistema genético primitivo fue producto del azar. Si el peso del argumento sobre el origen de la vida descansa sobre la formación de un sistema genético primitivo creado a partir de la conjunción azarosa de diferentes elementos bajo ciertas condiciones, el surgimiento de la vida se vuelve un hecho enormemente improbable. Estos problemas son los que guían el proyecto de investigación de Kauffman, y que se pueden plantear así: ¿cómo explicar convincentemente el hecho del surgimiento y la evolución de la vida?, ¿cómo explicar el orden mostrado por los sistemas adaptativos complejos? Para el proyecto Kauffmaniano, la clave está en tener en cuenta las capacidades de auto-organización de los sistemas complejos.

Pero, ¿qué nos dice este proyecto científico sobre nuestro conocimiento del mundo?, esto es: ¿qué nos dice sobre la emergencia de propiedades sistémicas?, ¿son un nivel irreducible de realidad?, ¿hay principios de orden que rigen los procesos de organización física, biológica, y social?, ¿continuará en el siglo XXI el debate sobre la independencia entre la

ciencia física y la ciencia biológica? En el centro del debate acerca del estudio sobre los sistemas vivientes o sistemas adaptativos complejos se encuentra la suposición de que éstos no pueden ser entendidos cuando para ello son utilizados planteamientos reduccionistas o lineales. Kauffman propone estudiar estos sistemas a partir de la interacción dinámica exhibida entre sus elementos, la cual conduce a la emergencia de nuevas propiedades. ¿En que sentido son “nuevas” estas propiedades emergentes?, ¿son fundamentales en el sentido de que no se pueden reducir? ¿Cuál es el alcance del proyecto Kauffmaniano en términos ontológicos y epistemológicos? Estas son algunas de las preguntas que rodean al proyecto Kauffmaniano.

La presente investigación analizará el proyecto que Stuart Kauffman, como uno de los más reconocidos representantes de las teorías de la complejidad, ha desarrollado para reorientar la postura evolucionista más tradicional (neo-darwinista), en torno al problema del orden biológico. Los objetivos principales de la presente investigación son: (1) definir en qué consiste el proyecto Kauffmaniano; (2) determinar su radicalidad y explicar cómo debe ser interpretada; y (3), sobre esta base, distinguir y analizar las implicaciones que para la ciencia y la filosofía tiene dicho proyecto con respecto al problema de la reducción teórica en biología. Por último, acercarnos a la relación existente entre las ciencias físicas y las ciencias biológicas.

La estructura dada a la presente investigación para cumplir los objetivos expuestos es la siguiente: en primer lugar, se describirán algunos de los trabajos realizados durante la década de los sesenta en diversos ámbitos del conocimiento: algunos de ellos influyeron en el proyecto emprendido por Kauffman, y otros, han ayudado a interpretarlo. Entre estos trabajos, se encuentran las investigaciones realizadas por Watson y Crick sobre la estructura de la molécula del ADN; los trabajos de Jacob y Monod en relación al estudio de las redes genómicas; la teoría de las estructuras disipativas propuesta por Prigogine; los análisis sobre la estructura de las revoluciones científicas desarrollados por Kuhn; y la metodología sobre los programas de investigación científica propuesta por Lakatos. Posteriormente, se expondrá cuál es el proyecto Kauffmaniano y el tema central en torno al que gira; a saber: el orden biológico emergente. A partir de este planteamiento, se detallarán las aportaciones que Stuart Kauffman ha hecho a la biología del siglo XXI en dos

cuestiones fundamentales: el origen de la vida y la evolución de los seres vivos, así como también sus aportaciones en el campo de las teorías de la complejidad. Se expondrá su teoría sobre los conjuntos auto-catalíticos y sus modelos NK y NKC sobre redes genómicas. En tercer lugar, se hará una valoración filosófica de su proyecto científico para determinar la radicalidad de éste y sus implicaciones con respecto al problema entre el reduccionismo y el antirreduccionismo en biología, y, a su vez, la relación existente entre la ciencia física y la ciencia biológica. Para llevar a cabo estas últimas tareas, en primer lugar, se analizará la doctrina emergentista desde sus comienzos en las últimas décadas del siglo XIX hasta sus últimos desarrollos ya entrado el siglo XXI. Se expondrán, entre otros, los trabajos desarrollados por los principales representantes del emergentismo inglés –Morgan, Alexander y Broad-, y los desarrollados por los neo-emergentistas: Bedau, O'Connor, y Stephan; además, se revisará la postura emergentista en términos tanto de su planteamiento micro-determinista como de su planteamiento macro-determinista. Posteriormente, se presentará una clasificación de la doctrina emergentista, se establecerá el lugar que ocupan las aportaciones de Kauffman dentro de dicha doctrina, y se determinará el alcance ontológico y epistemológico de su proyecto. Habiendo expuesto tanto su alcance científico como su alcance filosófico, se valorará su radicalidad a la luz de tres marcos explicativos: en términos de la noción Kuhniana de *revolución científica*, de *los programas de investigación científica* de Lakatos, y de *los estilos de razonamiento científico* de Hacking. A partir de esta serie de evaluaciones será posible, en un último paso, exponer las implicaciones que tiene el proyecto Kauffmaniano con respecto al problema del reduccionismo y el antirreduccionismo en biología, y también con el de la dependencia o independencia entre la ciencia física y la ciencia biológica, o mejor dicho, con el problema de su relación. En resumen, la presente investigación abordará uno de los problemas que la ciencia de nuestros días ha convertido en objeto de atención primaria: la organización de los sistemas complejos. El trabajo de Kauffman es una referencia obligada para su entendimiento.

Capítulo 1: La obra de Kauffman

El presente apartado muestra, en primera instancia, una breve semblanza de la trayectoria de Stuart Kauffman, así como sus principales líneas de investigación. Posteriormente, es planteado el contexto histórico en el cual se desarrolla su investigación. Este contexto comprende el periodo de 1960 a 1990. La recapitulación histórica se hace a partir de cuatro líneas distintas, tales líneas fueron escogidas porque guardan estrecha relación con el trabajo de Kauffman y, a la luz de ellas, se puede entender y evaluar el mismo.

En primer lugar, desde el campo de la biología molecular, se hará referencia a las investigaciones de Watson, Crick y Wilkins sobre la estructura molecular de los ácidos nucleicos, así como a los trabajos de Jacob y Monod, en torno al control genético de enzimas. En segundo lugar, desde el campo de la química y la termodinámica del no-equilibrio, se tomarán los trabajos de Prigogine, principalmente su teoría de las estructuras disipativas. En tercer lugar, se abordarán los trabajos desarrollados por Lorenz, Feigenbaum, Wilson, y Shaw en el campo de los sistemas dinámicos no-lineales (caóticos). Por último, desde el ámbito de la filosofía, se hará referencia a los trabajos desarrollados por Thomas Kuhn e Imre Lakatos.

1.1 Antecedentes biográficos.

Stuart Alan Kauffman nace el 28 de septiembre de 1939. Se desarrolla como biólogo investigador en los campos de la genética del desarrollo, la biología teórica, el origen de la vida, la evolución, y el estudio de los sistemas complejos, siendo en éste último ampliamente reconocido por su promoción de la noción de auto-organización, fenómeno que para él es, al menos, tan importante para explicar la producción de orden y novedad en los sistemas biológicos como la selección natural darwinista. Kauffman se graduó en filosofía y física por el Dartmouth College en el año de 1960, posteriormente, en 1963, estudió filosofía, psicología y fisiología en la Universidad de Oxford, y en el año de 1968, concluyó sus estudios de medicina en la Universidad de California. Después de una breve carrera como médico, se movió al campo de la investigación en genética del desarrollo en

la Universidad de Chicago, para, posteriormente, del periodo de 1975 a 1995, ser profesor de bioquímica y biofísica en la Universidad de Pennsylvania.

El Dr. Kauffman se asoció al Instituto Santa Fe –instituto dedicado al estudio de los sistemas complejos- permaneciendo como miembro residente de 1986 a 1997. Durante este periodo fue ampliamente reconocido, por un lado, gracias a su investigación sobre los llamados conjuntos auto-catalíticos, noción que juega un rol fundamental en la explicación del origen de la vida; y por el otro, debido a su investigación referente a las redes genómicas regulativas en el campo de la biología del desarrollo, y por sus modelos sobre paisajes de ajuste (NK y NKC) en el campo de la biología evolutiva. Estas investigaciones lo colocan, en el campo de la biología, como uno de los principales contribuidores y exponentes de las llamadas teorías de la complejidad y el caos, desarrolladas hacia finales del siglo XX.

Su primer libro *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution* fue publicado en 1993. Esta obra, que resume 20 años de su trabajo de investigación, explica el papel fundamental que juega la auto-organización en el origen y evolución de la vida. Su segundo libro *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity* fue publicado en 1995. En este trabajo añade la dimensión tecnológica y cultural a su programa de investigación. *Investigations* es, en el año 2000, su último libro publicado. En él se explora la idea acerca de si pueden existir algunas leyes generales que gobiernen un cierto tipo de sistemas en no-equilibrio. En este mismo año pasa a formar parte del comité consultivo para la protección planetaria del consejo asesor de la NASA.

1.2 Contexto histórico en el que se desarrolla su investigación.

El 11 de diciembre de 1962, nueve años después de la publicación en la revista *Nature* del ya celebre artículo¹ que planteaba la estructura de doble hélice del ADN (ácido des-oxi-ribonucleico) y el mecanismo de duplicación genética, James Watson, Francis Crick, y Maurice Wilkins reciben el premio Nobel de medicina por sus descubrimientos correspondientes a la estructura molecular de los ácidos nucleicos y su importancia para la transferencia de información en el material viviente. El proyecto de este grupo de investigadores era encontrar la estructura fundamental de la molécula que permitía transmitir la información genética hereditaria. En palabras de Watson:

“El centro de la biología era el gen y su control del metabolismo celular. El principal reto en biología era entender la replicación genética y la forma en la cual los genes controlan la síntesis de las proteínas. Era obvio que estos problemas podrían ser lógicamente atacados sólo cuando la estructura del gen llegara a ser conocida. Esto significaba resolver la estructura del ADN”. [1962, pp. 785)

Los trabajos de Watson, Crick, y Wilkins aportaban una base sencilla, pero, a la vez, clara y robusta para entender el origen de la vida. Si el ADN, formado por cuatro bases: adenina (A), guanina (G), citosina (C), y timina (T) era descrito como una doble hélice en la cual cada hélice o hebra es el complemento de la otra, y si la secuencia de bases (A, G, C, T) a lo largo de una de ellas especificaba la secuencia de bases a lo largo de la otra, y viceversa, entonces la doble hélice del ADN podría ser una molécula capaz de replicarse espontáneamente a sí misma. Watson y Crick se refieren a esta situación de la siguiente forma:

[...] “si únicamente se pueden formar pares específicos de bases, y si la secuencia de bases sobre una cadena es dada, entonces la secuencia sobre la otra cadena esta ya determinada”. [Watson, Crick 1953, pp. 737]

¹ El artículo referido, que consta de dos páginas únicamente, comienza con la evaluación de las estructuras propuestas, en primer lugar, por Pauling y Corey, y posteriormente, la desarrollada por Fraser. Para Watson y Crick ambas estructuras mostraban claras deficiencias, la primera no explicaba las fuerzas que mantienen unida a la estructura y, además, las distancias llamadas de Van der Waals no mostraban ser las correctas; por otra parte, la estructura propuesta por Fraser la calificaban, simplemente, como mal definida, y por esa razón, no comentaron más al respecto. La segunda parte del artículo es una descripción no del todo profunda, como ellos mismos lo reconocieron, de la estructura de doble hélice, no mostraban bajo que condiciones y supuestos construyeron el modelo. Cf. “Molecular Structure of Nucleic Acids. A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid”, *Nature*, 171, 1953, pp. 737-738.

En este sentido, la misma molécula que es reconocida como la molécula maestra de la vida², la portadora del programa genético por el cual el organismo es computado desde la fertilización del huevo, esa misma molécula podría haber sido la primera en auto-reproducirse para dar paso, así, al comienzo de la vida. [Kauffman 1995, pp. 38]

El trabajo de estos investigadores marcó e impulsó de manera importante el rumbo de posteriores investigaciones en el campo de la genética, prueba de ello son los tres premios Nobel otorgados esa misma década (Jacob, Monod, Lwoff 1965; Holley, Khorana, Nirenberg 1968; Delbrück, Hershey, Luria 1969) por diversas contribuciones en el mismo campo. Entre los problemas³ importantes que quedaban por resolver, en torno a la propuesta de la doble hélice, estaba el de explicar cómo era posible la auto-replicación de una molécula de ADN en ausencia de un ensamblaje complejo de enzimas proteínicas, ya que una molécula desnuda de ADN no se auto-replica, para que sea así, el complejo de enzimas debe estar ya presente.

Por otra parte, los investigadores François Jacob, Jacques Monod, y André Lwoff recibían, en 1965, el premio Nobel de medicina por sus descubrimientos concernientes al control genético de las enzimas y la síntesis de los virus. Jacob y Monod plantearon el marco conceptual para explicar la diferenciación celular y la ontogénesis. Explicaron cómo el gen, que tiene codificada la síntesis de una proteína, es transcrito del ADN al ARN (ácido ribonucleico). El ARN mensajero correspondiente es traducido, vía el código genético, en una proteína. Jacob y Monod hicieron su descubrimiento estudiando el comportamiento de una bacteria del intestino conocida como *E. coli* y la respuesta de ésta a la lactosa (azúcar). Era conocido que cuando la lactosa es añadida primero al medio, las células son incapaces de utilizar la molécula. La enzima apropiada para la descomposición de la lactosa, la beta-galactosidasa, no está presente en la célula bacteriana en una concentración suficiente. Pocos minutos después de la adición de la lactosa las células de la *E. coli* empiezan a

² Para una revisión crítica de esta postura, consultar la obra de Richard Lewontin: *The Doctrine of DNA*, Penguin Books, 1993.

³ Algunos de los problemas que no resolvían los trabajos de Watson y Crick en ese momento eran de carácter semántico, esto es, no había pistas sobre cómo interpretar una secuencia de bases. Cf. Haynes, B.: "The Invention of the Genetic Code", *American Scientist*, 86, 1998, pp. 8-14

sintetizar la beta-galactosidasina y comienzan, entonces, a usar lactosa como un recurso para el crecimiento y la división celular.

Jacob y Monod pronto descubrieron cómo tal inducción de enzimas, término usado para la capacidad que tiene la lactosa de inducir la síntesis de la beta-galactosidasina, es controlada. Esto sugiere que el control ocurre al nivel de la transcripción del gen de la beta-galactosidasina en el correspondiente ARN mensajero. Adyacente a este gen estructural – llamado así porque el gen codifica la estructura de una proteína- Jacob y Monod descubrieron que hay una secuencia corta de nucleótidos en el ADN a la cual se une la proteína. La secuencia corta es llamada operador. La proteína que se une al operador es llamada represor. Como el nombre lo indica, cuando la proteína represora es unida al sitio del operador, el gen de la beta-galactosidasina es reprimido, por lo tanto, ningún ARN mensajero es formado por esa enzima, y la enzima misma no es formada por traducción del ARN mensajero. Cuando la lactosa entra a la célula de la *E. coli*, ésta se une al represor, cambiando su forma, y de esta manera el represor no puede ya unirse al operador. Así, la adición de lactosa libera el sitio del operador. Una vez que el operador es liberado, puede comenzar la transcripción del gen adyacente estructural de la *E. Coli*, y la enzima beta-galactosidasina pronto es producida. [Kauffman 1995, pp. 95-96]

Jacob y Monod habían descubierto que una pequeña molécula podía “activar” un gen. Dado que el represor mismo es el productor de otro gen *E. coli*, se hace evidente que los genes pueden formar circuitos genéticos en los que se “activan” o “desactivan” unos a otros. Jacob y Monod sugirieron que la diferenciación celular era controlada por tal circuito genético. ¿Cuáles son las leyes que gobiernan tales circuitos? Para Monod no existen tales leyes, los circuitos producen opciones que pueden, o no, ser favorecidas por la selección natural; en otras palabras, es cuestión de azar⁴.

Años más tarde, en 1977, el premio Nobel de química fue otorgado al investigador ruso-belga Ilya Prigogine, debido a sus contribuciones en el campo de la termodinámica del no

⁴ Monod desarrolla ampliamente las consecuencias de su programa de investigación en su obra: *El Azar y la Necesidad*, Tusquets, 1981.

equilibrio⁵, principalmente por su teoría sobre las estructuras disipativas. Prigogine, en 1967, introdujo explícitamente el concepto de estructura disipativa en una comunicación titulada *Estructura, Disipación y vida*. [Wasenberg en Prigogine 1998, pp. 10].

Prigogine sostiene que las estructuras disipativas son formas alejadas del equilibrio. El equilibrio es el estado máximo de entropía. En el equilibrio, la energía útil se ha disipado. Estas estructuras para mantener su forma deben disipar la entropía constantemente para que no crezca dentro de la identidad y la “mate” con equilibrio. La disipación de la entropía requiere de una entrada constante de materiales y energía, por lo cual las estructuras disipativas deben formarse en situaciones alejadas del equilibrio. En la termodinámica clásica, una medida de la eficacia de un proceso es una baja producción de entropía. Las estructuras disipativas son eficaces precisamente por la razón contraria. En su alta generación de entropía y continua apertura a la entrada fluctuante de energía, la estructura disipativa trasciende la termodinámica del sistema cerrado. Esto hace, también, de la estructura disipativa una paradoja. Puede sobrevivir sólo permaneciendo abierta a un intercambio fluido de materia y energía con el medio ambiente (Briggs y Peat, 1996).

Prigogine descubrió que los sistemas que se alejan del equilibrio (aquel punto donde las partículas del sistema están paralizadas o se mueven al azar en total desorden), presentan características las cuales los llevan a un estado donde eventualmente surge el orden^{6, 7}. Para Prigogine, orden y caos es un flujo continuo que permea los sistemas disipativos en contacto con el medio ambiente. Estos importan energía para su desarrollo y crecimiento, mientras exportan deshechos en formas más entrópicas. Este material expuesto al medio ambiente sirve de alimento para otros sistemas los cuales lo usarán nuevamente convirtiéndolo en ingrediente para su desarrollo.

⁵ En 1962, Prigogine publica una obra que es el fundamento de sus posteriores desarrollos en el campo de los sistemas alejados del equilibrio. Cf. *Non-Equilibrium Statistical Mechanics*, New York, John Wiley and Sons, 1962.

⁶ Una revisión general del proyecto de Prigogine puede ser encontrado en: Bishop, R. C.: “Non-Equilibrium Statistical Mechanics Brussels-Austin Style”, *Studies In History And Philosophy Of Modern Physics*, 35, 2004, pp.1-30.

⁷ Un par de críticas realizadas al proyecto de Prigogine pueden consultarse en: Bricmont, J.: “Science of Chaos or Chaos in Science”, *Physicalia Magazine*, 17, 1995, pp. 159-208; y, también, en: Hayles, K.: *La Evolución del Caos*, Barcelona, Gedisa, 1998.

El orden por fluctuaciones es un mecanismo el cual hace posible el desarrollo de la auto-organización⁸, fenómeno que resulta elemental para la formación de estructuras disipativas. Las fluctuaciones son el mecanismo molecular para verificar la inestabilidad. Pequeñas variaciones en las fluctuaciones del sistema son despreciables y éste permanece en estado estable, no así cuando las fluctuaciones se amplifican, en este punto el sistema se vuelve inestable, el sistema está en el límite del caos, punto donde se genera la auto-organización que llevará al sistema a otro estado diferente de orden (Prigogine, 1997). Las fluctuaciones ponen a prueba constantemente la estabilidad de un sistema viviente, y en cierto momento, una o varias de estas fluctuaciones pueden hacerse tan fuertes que empujarán al sistema, a través de situaciones de inestabilidad, hacia una estructura totalmente nueva, que, a su vez, será fluctuante y relativamente estable. La estabilidad de los sistemas vivos nunca es absoluta, persistirá mientras las fluctuaciones no lleguen a superar un nivel crítico dimensional, pero cada sistema está siempre dispuesto a transformarse, a evolucionar.

Este modelo básico de evolución, ideado por Prigogine y sus colaboradores para describir las estructuras químicas disipativas, se ha aplicado con éxito, desde entonces, para describir la evolución de los sistemas biológicos. En palabras de Prigogine:

“Un sistema biológico, que metaboliza y se reproduce, debe, efectivamente, intercambiar energía y materia con el entorno; por lo tanto, funciona como sistema abierto. Por otra parte, el mantenimiento de la vida y el crecimiento dependen de un sinnúmero de reacciones químicas y de fenómenos de transporte, cuyo control implica la intervención de factores no-lineales (activación, inhibición, auto-catalización directa, etc.). Finalmente, el aporte de energía o de materia se efectúa, generalmente, en condiciones inestables, ya que los productos de reacción son expulsados del sistema vivo o enviados a otros lugares de la célula para que desempeñen otras funciones. En resumen: el funcionamiento de los sistemas biológicos parece cumplir las condiciones necesarias para que aparezcan las estructuras disipativas”. [Prigogine, 1997, pp. 316].

Para Prigogine, las estructuras disipativas desempeñan un papel importante en el mantenimiento de la vida y en la explicación de su origen (Prigogine, 1997).

Por otra parte, Edward Lorenz –en un campo que no era el de la biología o la química– descubrió, en la década de los años sesenta, ciertas propiedades de los sistemas dinámicos

⁸ Para profundizar en la noción de auto-organización a partir de la teoría de las estructuras disipativas consultar: Prigogine, I., Nicolis, G.: *Self-Organization In Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*, New York, John Wiley and Sons, 1977.

no-lineales⁹ mientras trataba de construir un modelo de las condiciones meteorológicas de la tierra. Lorenz pensaba que podría comprender cómo cambia el tiempo por medio de tres ecuaciones diferenciales no-lineales. La no-linealidad era importante porque evitaba que las pautas se repitieran exactamente. Sin embargo, Lorenz obtuvo más impredecibilidad que la que buscaba. Había programado su ordenador para que desplegara las soluciones gráficamente, como líneas ondulantes de símbolos. Lorenz interrumpió una secuencia en la mitad de su curso y, en vez de empezar de nuevo desde el principio, introdujo los puntos medios de los valores en el ordenador para hacer continuar la secuencia. Lorenz suponía que esta secuencia desde el punto medio concordaría con la primera secuencia. Para su sorpresa, cuando comparó las dos líneas descubrió que divergían; al principio sólo un poco, pero después más y más. Al reflexionar sobre el hecho se dio cuenta de que el monitor estaba amplificando una diferencia insignificante en las condiciones iniciales. El ordenador almacenaba hasta seis dígitos en su memoria, pero la salida sólo mostraba tres. Cuando reinició la secuencia desde su punto medio con estos tres dígitos, empezó desde un lugar ligeramente diferente que aquél donde la secuencia se había detenido. Esta pequeña discrepancia inicial se amplificó hasta que el resultado final fue un patrón bastante diferente del original. Llevado al pronóstico del tiempo, este resultado implicaba la dependencia sensible a las condiciones iniciales. El mismo Lorenz ideó una analogía que ilustra perfectamente este concepto: el efecto mariposa. El aleteo de una mariposa en Hong Kong, por ejemplo, podía causar un tornado en la ciudad de Kansas. Lorenz empezó a explorar más detalladamente el comportamiento de este modelo. Descubrió que los datos contenían lo que después sería llamado *atractor extraño*.

Después de Lorenz algunos otros reconocidos nombres han surgido en la historia del “caos”. Feigenbaum, por ejemplo, a principios de 1980 se preguntaba si fenómenos aparentemente caóticos podrían ser pseudo-aleatorios, obedeciendo a programas deterministas, tal como lo hacen los números pseudo-aleatorios. Esta sorprendente premisa equivale a decir que el caos tiene una estructura profunda. Uno de los primeros indicios de que en realidad podría existir una estructura profunda fue el descubrimiento de Feigenbaum

⁹ Una recapitulación histórica de los avances en el campo de los sistemas dinámicos no-lineales puede encontrarse en: Gleick, J.: *Chaos: Making a New Science*, New York, Viking, 1987; así como en: Wolfram, S.: *A New Kind of Science*, Wolfram Media, 2002.

acerca de que los sistemas que pasan de estados ordenados a estados caóticos siguen un patrón característico de doble periodicidad. La duplicación del periodo se reconoce ahora como una poderosa generalización, que describe el comienzo del caos en cualquier cosa. Kenneth Wilson, ganador en 1982 del premio Nobel de física por su teoría de los fenómenos críticos en conexión con las transiciones de fase, utilizó la técnica de renormalización junto con la idea de grupos matemáticos para representar las simetrías recursivas. Las simetrías recursivas permiten entender, pese a lo diferentes que son, los flujos turbulentos y los comportamientos de cambio de fase. Esto mismo permite, en relación al caos, una explicación de los atractores extraños. Robert Shaw, de la Universidad de California en Santa Cruz, es conocido por proponer la conexión entre caos e información (precedido por Claude Shannon). Feigenbaum ubicó la fuente de la incerteza en las condiciones iniciales. Él sostuvo que éste era el único lugar en el cual la incerteza podía haber entrado, ya que tanto las ecuaciones como las iteraciones de ordenador eran deterministas. El énfasis de Shaw sobre los sistemas físicos, por el contrario, lo llevó a una interpretación basada sobre la experimentación. Él consideró que el caos surge de “cierta información hasta ahora no observable”. Para Shaw, el caos es la fuente de toda nueva información en el mundo. Concibe el mundo físico como un gran flujo turbulento de información (Hayles, 1998).

En el ámbito de la filosofía, era el año de 1962 cuando se publicaba la ya celebre obra de Thomas Kuhn *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. Kuhn, físico convertido en historiador de la ciencia, sostenía en su obra que los grandes cambios científicos no ocurrían en los términos objetivistas asumidos por el cientificismo tradicional, esto es, la aceptación de una nueva teoría sobre otra no ocurría porque ésta resolvía las preguntas que su rival no lograba contestar, o porque era más sencilla y tenía el mismo poder de explicación, o porque ésta refutaba con un nuevo experimento crucial a su oponente. En lugar de ello ocurría un cambio de paradigma, una forma distinta de plantear las preguntas, de percibir o plantear los problemas. Para Kuhn las revoluciones científicas son el desarrollo de episodios no acumulativos en los cuales el viejo paradigma es remplazado en su totalidad, o en parte, por uno nuevo, y el cual viene a ser incompatible con el anterior (Kuhn, 1963). Kuhn lo describía de este modo:

“Cuando los paradigmas entran, como deben hacerlo, en un debate sobre cuál paradigma elegir, su rol es necesariamente circular. Cada grupo usa su propio paradigma para argumentar en defensa de ese mismo paradigma [...] este problema de la elección de paradigma nunca puede ser, inequívocamente, fijado sólo por lógica o por experimentos” [1963, pp. 93].

Kuhn continúa:

“En los argumentos parciales y circulares, que regularmente resultan, cada paradigma habrá mostrado satisfacer más o menos los criterios que dictan para sí [...] pero dado que aún ningún paradigma resuelve todos los problemas que estos definen y ninguno de los dos paradigmas deja los mismos problemas sin resolver, los debates sobre los paradigmas siempre involucran la pregunta: ¿qué problema es más significativo haber resuelto? [...] esa pregunta de valores sólo puede ser contestada en términos de criterios que se encuentran fuera de la ciencia en su conjunto, y es este recurrir a criterios externos lo que hace a los debates sobre paradigmas ser revolucionarios” [1963, pp. 109].

Una consecuencia de este rompimiento es que el cambio de paradigma no puede ser racionalmente justificado [Purtil 1967, pp. 54]. De esta manera, Kuhn conducía, como lo ha expresado Rorty [1996, pp. 77], a socavar la distinción entre epísteme y doxa.

Su contribución al campo de la sociología del conocimiento fue notable, pues su trabajo hacía del corazón de la investigación científica una actividad más social de lo que se pensaba anteriormente. Lakatos interpretaba el trabajo de Kuhn como una postulación de la irracionalidad de los grandes cambios científicos [1970, pp. 118], mientras que Kuhn lo negaba, aceptando, cuando mucho, que aquello que proponía era cambiar la noción corriente acerca de lo que por racionalidad se entendía [Kuhn 1970, pp. 139].

Imre Lakatos publicó en 1970 su artículo “Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales”. A diferencia de Kuhn, Lakatos concibe el progreso de la ciencia en términos de programas coherentes de investigación en lugar de teorías aisladas que compiten entre sí (Lakatos 1970a, pp. 99). Lakatos explicaba cómo la historia de la ciencia debería aprender de la filosofía de la ciencia y viceversa. Su proyecto lo planteaba de la siguiente forma:

“Será argumentado que: (a) la filosofía de la ciencia provee metodologías normativas en términos de las cuales los historiadores reconstruyen “la historia interna” y de ese modo provee una explicación del crecimiento del conocimiento objetivo; (b) dos metodologías en competencia pueden ser evaluadas con la ayuda de la historia (normativamente interpretada); (c) cualquier reconstrucción racional de la historia necesita ser complementada con una “historia externa” empírica (socio-psicológica)

[...] la historia interna, así definida, es primaria, y la historia externa sólo secundaria. De hecho, en vista de la autonomía de la historia interna (pero no de la externa), la historia externa es irrelevante para el entendimiento de la ciencia” [Lakatos 1970a, pp. 91-92].

Para Lakatos el progreso de los programas de investigación se da en tanto que su crecimiento teórico anticipa su crecimiento empírico, esto es, predice nuevos hechos con cierto éxito; se dice que los programas se estancan si su crecimiento teórico queda rezagado tras el crecimiento empírico, esto es, sólo da explicaciones *post-hoc* de hechos anticipados o descubiertos en un programa rival [Lakatos 1970a, pp. 100]. Si un programa de investigación explica progresivamente más que uno rival, éste suple al otro, y el rival puede ser eliminado. Lakatos sostenía que si un experimento es crucial o no, o si una hipótesis es altamente probable a la luz de la evidencia disponible o no, no depende en lo más mínimo de las creencias de los científicos, de su personalidad, o de su autoridad. Estos factores subjetivos no son de interés para ninguna historia interna [Lakatos 1970a, pp. 106]. Para Lakatos el cambio científico, en resumen, es racional.

Capítulo 2: Principales aportaciones de Kauffman a la biología del siglo XXI

El capítulo anterior, por una parte, describió brevemente la trayectoria científica de Stuart Kauffman resaltando las principales líneas de investigación que ha seguido a partir del año de 1968; y, por otra, introdujo algunas de las investigaciones precedentes más significativas y fundamentales para el entendimiento del contexto en el cual se ha desarrollado su proyecto de investigación. El presente capítulo tiene como finalidad exponer, con toda claridad, cuál es el tema central en torno al cual gira el proyecto Kauffmaniano. A partir de este planteamiento, se detallará en qué consisten las aportaciones que Stuart Kauffman hace a la biología del siglo XXI en dos cuestiones fundamentales: el origen de la vida y la evolución de los seres vivos. Como consecuencia de lo anterior, se detallarán las aportaciones hechas al campo de estudio de los sistemas adaptativos complejos explicando la noción de auto-catálisis y conjuntos auto-catalíticos; el concepto de redes booleanas; la noción de paisajes de ajuste y los modelos NK-NKC; y, por último, la noción de orden espontáneo.

2.1 Planteamiento central del proyecto Kauffmaniano

Durante el transcurso de sus estudios en ciencias médicas, Kauffman se planteó las siguientes preguntas:

“¿Puede el vasto y magnífico orden observado en el desarrollo (proceso ontogenético), de una manera comprensible, surgir como una propiedad espontánea, auto-organizada, de los sistemas genéticos complejos? [...] ¿debió el proceso de selección natural haber luchado contra toda probabilidad para crear orden?”.
[Kauffman, 1990, pp. 300].

Desde entonces, Kauffman ha cuestionado seriamente la idea sostenida por la tradición neo-darwinista la cual afirma que únicamente por medio de mutaciones al azar y de acuerdo

al proceso de selección natural, el sistema genético, desde sus inicios, ha podido coordinar la interacción de miles de genes para que se encuentren éstos en el lugar correcto y en el momento oportuno, dando así como resultado las combinaciones afortunadas que provocan el desarrollo y el orden biológico observado en la naturaleza. En esta misma línea, a partir de los trabajos de Jacob y Monod se conoce que los genes pueden ser afectados por otros genes –como anteriormente se señaló- formando redes genómicas de interacción. Asumiendo que los genes pueden ser afectados o no, por otros genes, su espacio de estados¹⁰ está dado por la expresión 2^N . Si se supone una red de aproximadamente 30,000 genes su espacio de estados está dado por el número $2^{30,000}$, el cual es un número de proporciones inimaginables. Si se pretendiera explorar tal espacio, suponiendo que la búsqueda de cada estado tardara una billonésima de segundo, no serían suficientes los aproximadamente 13 mil millones de años en que se calcula la edad del universo para realizar dicha tarea. Kauffman continúa:

“¿De dónde proviene este orden, esta vida a cántaros que veo desde mi ventana: apresuradas arañas haciendo su medio de vida con sus redes (de pre-nylon), astutos coyotes en las cimas de las montañas [...]?”. [Kauffman 1995, pp. 7-8]

Desde este punto de vista resulta impensable que los procesos de diferenciación celular (incremento en la diversidad de las células tipo) y morfogénesis (formación coordinada de tejidos y órganos), llevados a cabo durante la ontogénesis, son consecuencia del azar y la selección tal y como lo explica una biología que ha llegado a ser la “ciencia de lo accidental, lo *ad hoc*” [Kauffman 1995, pp.7]. Además, Kauffman plantea por qué la selección natural por sí sola es insuficiente para explicar el orden del mundo biológico. En primer término critica el supuesto gradualista¹¹ sobre el cual descansa la teoría de la

¹⁰ Lo que el espacio de estados representa es la condición de actividad de los genes, provocada por la misma red de interacción. Matemáticamente se expresa como 2^N , en donde el número 2 se refiere a la cantidad de estados posibles, y N, al número de elementos de la red. Por ejemplo, si se tiene una red de 3 genes (A, B, C), y estos únicamente pueden mostrar dos estados, a saber, activo o inactivo, el espacio de estados es igual a 8, esto es, pueden estar todos activos o todos inactivos (A,B,C); A activo, pero B y C inactivos; A y B activos, pero C inactivo; A y C activos, pero B inactivo; B activo, pero A y C inactivos; B y C activos, pero A inactivo; y C activo, pero A y B inactivos.

¹¹ No sólo Kauffman ha criticado el supuesto gradualista de la teoría evolutiva darwinista, Gould y Eldredge han postulado la teoría del equilibrio puntuado para explicar la existencia de largos periodos de estabilidad experimentados por las especies, seguidos de cortos periodos de rápida adaptación. Bak y Boettcher afirman que aunque la teoría del equilibrio puntuado debe ser tomada en consideración, ésta no explica la dinámica o el proceso genérico por el cual se pasa de un estado estable a uno de rápidos cambios. Ellos sostienen que el principio de criticidad auto-organizada (self-organized criticality) puede contribuir a explicar tal

evolución darwinista, esto es, la idea de que ciertas alteraciones (mutaciones) en el genoma o genotipo causan variaciones menores en las propiedades del organismo (fenotipo), logrando con ello una acumulación paulatina de variaciones útiles. Esto no se puede sostener porque, por una parte, pequeños cambios pueden provocar errores catastróficos en el comportamiento del sistema y, por otra, aun en el supuesto de que pequeñas mutaciones pueden causar cambios menores en el fenotipo, no significa que la selección puede, con éxito, acumular pequeñas mejoras. En lugar de ello lo que puede ocurrir es un “error catástrofe” y, entonces, una población en adaptación puede acumular en lugar de una serie de pequeñas mejoras una serie de pequeños errores [Kauffman 1995, pp.152]. En segundo término, como ya se vio, encontrar en una búsqueda aleatoria un estado óptimo o uno de los pocos estados óptimos de adaptación dentro de un espacio de proporciones astronómicas resulta francamente improbable.

Queda claro que el tema central del proyecto Kauffmaniano es *el orden biológico*. De ahí que él se plantea cuestionamientos, por una parte, concernientes al orden observado en la formación, desarrollo, y diversificación de los seres vivos y, por otra, referentes al orden en la creación de las primeras formas de vida. Si el dogma darwinista y neo-darwinista es incompleto, si la selección natural y las variaciones al azar no son razón suficiente para explicar el orden existente en la naturaleza, ¿qué hace falta entonces para soportar una teoría evolutiva que dé cuenta, convincentemente, del orden y la coherencia existente en el mundo de lo viviente? La respuesta es: una biología que sea capaz de sustentar leyes del orden. Kauffman lo expone en los siguientes términos:

“Si los físicos están en lo correcto, toda esta diversidad puede ser entendida únicamente como una consecuencia de las leyes fundamentales que han sido buscadas desde Kepler y Galileo [...] Ésta, la más profunda de las esperanzas científicas, esta búsqueda por las leyes fundamentales, debe ser mantenida en su más profundo aspecto: es el ideal del reduccionismo en ciencia [...] Nosotros buscamos explicaciones reduccionistas. Los fenómenos económicos y sociales tienen que ser explicados en términos del comportamiento humano. A su vez, ese comportamiento tiene que ser explicado en términos de procesos biológicos, los cuales, a su vez, tienen que ser explicados por procesos químicos, y ellos, a su vez, por procesos físicos.

comportamiento, esto es, el del equilibrio puntuado. Para una revisión más profunda de estas posturas consultar: Gould, S. J., Eldredge, N.: “Punctuated-Equilibria: The Tempo and Mode of Evolution Reconsidered”, *Paleobiology*, 3, 1977, pp. 115-151; y también: Bak, P., Boettcher, S.: “Self-Organized Criticality and Punctuated Equilibria”, *Physica D*, 107, 1997, pp. 143-150.

Mucho se ha dicho acerca de la validez del programa reduccionista. Pero muchos de nosotros estaríamos de acuerdo en que: [...] si nosotros encontráramos la teoría final, nosotros sólo habremos comenzado nuestra tarea [...] nosotros deberíamos, entonces, verdaderamente, comenzar a computar las consecuencias de dicha ley”. [Kauffman 1995, pp. 16].

Si, como yo creo, muchas de las propiedades robustas existen, entonces, profundas y hermosas leyes pueden gobernar la emergencia de la vida y la población de la biosfera [...] Nosotros no podemos nunca esperar predecir la exacta ramificación del árbol de la vida, pero podemos descubrir poderosas leyes las cuales pueden predecir y explicar su forma general. Yo espero por tales leyes. Aún comparto la esperanza de que podremos comenzar a esquematizar algunas de ellas ahora [...] Yo llamo a esos esfuerzos la búsqueda por una teoría de la emergencia”. [Kauffman 1995, pp. 23].

Kauffman apela por una teoría de la emergencia que logre postular robustas leyes del orden, en otras palabras, busca generalidades, no detalles, pues aunque no se conozcan los detalles se pueden construir teorías que permiten explicar propiedades genéricas. Pretende, en este sentido, apartarse de una ciencia biológica histórica plagada de accidentes; opta, entonces, por una biología que pueda aportar leyes de regularidad y que sea capaz de descubrir patrones generadores de orden. La mecánica estadística es la herramienta adecuada para este cometido ya que permite identificar los patrones recurrentes de los comportamientos promedio y no los comportamientos individuales, como lo hace la mecánica clásica. Esta puntualización es importante porque marca la ruta y el marco de referencia que Kauffman ha tomado para desarrollar su proyecto. El lo expone de la siguiente manera:

“La esperanza aquí es caracterizar diferentes clases de propiedades del sistema que [...] son típicas y genéricas y que no dependen de los detalles [...] La mecánica estadística nos da nuestro más claro ejemplo del uso de los promedios estadísticos, de ahí, propiedades que son típicas y genéricas se toman como descriptores compactos de un sistema complejo.

La mecánica estadística demuestra que podemos construir teorías sobre aquellas propiedades de los sistemas complejos que son insensibles a los detalles.

Descubrir la existencia de propiedades fundamentales de los sistemas vivientes complejos que no dependen de los detalles yace en el centro de la esperanza de construir una teoría profunda del orden biológico. Si todas las propiedades de los sistemas vivientes dependen de cada detalle de su estructura y lógica [...] entonces los problemas epistemológicos a los que nos enfrentamos en el intento por entender las maravillas de la biosfera son vastos. Si en lugar de ello, los fenómenos centrales de la más profunda importancia no dependen de todos los detalles, entonces podemos esperar encontrar hermosas y profundas teorías”. [Kauffman 1995, pp. 17-18].

La pregunta ahora es: ¿por dónde comenzar a construir una teoría de la emergencia que postule tales leyes del orden para que, sobre esa base, sea posible explicar el origen y evolución de la vida sin quedar atrapados exclusivamente en la accidentalidad biológica de los detalles?

2.1.1 Las teorías de la complejidad: la auto-organización

Kauffman encuentra en las llamadas ciencias de la complejidad¹² un marco conceptual desde el cual sostener una teoría de la emergencia que no se limite a dar una explicación apoyada solamente en variaciones aleatorias y el proceso de selección natural. Como él lo apunta:

“[...] las emergentes ciencias de la complejidad comienzan a sugerir que el orden no es del todo accidental, que las vastas venas del orden espontáneo están a la mano. Las leyes de la complejidad generan espontáneamente mucho del orden del mundo natural. Entonces la selección entra en acción, moldeando y refinando”. [Kauffman 1995, pp. 8].

“Una nueva ciencia, la ciencia de la complejidad, está naciendo. Esta ciencia promete transformar las ciencias biológicas y sociales en los siglos por venir”. [Kauffman 1990, pp. 299].

Las ciencias o teorías de la complejidad pretenden explicar fenómenos que se caracterizan por su no-linealidad, por el grado de interrelación y sensibilidad de sus variables, y por presentar ciertos tipos de comportamiento, dependiendo del estado en el que se encuentre el sistema (estable, caótico, periódico, y una región que se encuentra entre lo estable y lo caótico llamada *el límite del caos*) [Kauffman 1990, pp. 307]. La auto-organización es un fenómeno que ocurre en la transición de fase entre un estado estable y uno caótico, es un fenómeno que se da en la región de estado conocida como *el límite del caos*. En esta región cercana a la transición de fase, “los más complejos comportamientos pueden ocurrir – suficientemente ordenados para asegurar la estabilidad y aun llenos de flexibilidad y de sorpresa-” [Kauffman 1995, pp. 87]. En esta región es donde se coordina el

¹² Hablar de ciencias de la complejidad es una generalidad. Esta generalidad engloba propuestas que van desde la teoría del caos (teoría de los sistemas deterministas no-lineales) hasta la sinérgica de Haken (1977), la teoría de las estructuras disipativas de Prigogine (1977), la criticidad auto-organizada de Per-Bak (1991), etc. Para una exposición de algunos de los conceptos centrales de estas teorías revisar los apéndices contenidos al final de este trabajo.

comportamiento complejo que llegará a producir propiedades emergentes como la vida, la evolución misma, y la creación de nuevas especies. Este fenómeno ha sido estudiado desde una diversidad de campos¹³: la física, la química, la biología, las matemáticas, la cibernética, etc. Kauffman ya había reconocido este fenómeno cuando, en la década de los setenta, desarrolló una herramienta de análisis llamada redes booleanas. Las redes booleanas (herramienta que se detallará con mayor amplitud posteriormente) simulan lo que Jacob y Monod habían descubierto años antes, que los genes pueden afectar el comportamiento de otros genes dentro de una red genómica. Kauffman descubrió que bajo ciertos parámetros encontrados en sus simulaciones era posible la coordinación del comportamiento de tan complejo sistema. Siguiendo esta línea, para él existía otro elemento fundamental que debía ser tomado en cuenta para explicar el orden biológico: *la auto-organización*¹⁴.

[...] “la selección natural es importante, pero ésta no ha trabajado sola para crear las finas arquitecturas de la biosfera: de la célula al organismo y al ecosistema. Otro recurso –la auto-organización– es el recurso raíz del orden. El orden del mundo biológico, he llegado a creer, no es meramente un truco, sino que surge natural y espontáneamente a partir de estos principios de auto-organización –leyes de la complejidad que nosotros estamos solamente comenzando a descubrir y entender”. [Kauffman 1995, pp. VII].

La auto-organización se puede entender como *el proceso en el cual las interacciones locales entre los elementos de un sistema producen patrones emergentes de comportamiento sin que para ello sea necesario algún tipo de coerción o control externo. Estos patrones o comportamientos surgen en ausencia de un diseño o plan central y se consideran emergentes porque no pueden ser deducidos a partir del conocimiento total de los elementos de menor nivel ni de la naturaleza de las interacciones entre ellos.* [Anderson 2002, pp. 248].

¹³ Kauffman presenta una breve semblanza de cómo, a partir de diferentes campos de estudio, diversos investigadores han coincidido en sus hallazgos con respecto al fenómeno que se presenta cuando el sistema observado se encuentra en una región no del todo estable, de tal suerte que son posibles los cambios en él; ni demasiado inestable, del tal modo que no llegen a existir patrones reconocibles de comportamiento. Cf. Kauffman, S.: “The Science of Complexity and Origins of Order”, *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 2, 1990, pp. 299-322.

¹⁴ Para una revisión de la noción de auto-organización consultar: Anderson, C.: “Self-Organization in Relation to Several Similar Concepts: Are the Boundaries to Self-Organization Indistinct?”, *The Biological Bulletin*, 202, 2002, pp. 247-255

Si la selección natural y las variaciones al azar no son argumento suficiente para explicar, desde la óptica de Kauffman, el orden biológico apreciado en la naturaleza, y para ello es necesario introducir los principios de auto-organización, entonces ¿qué relación existe entre la selección natural y la auto-organización? ¿Qué papel desempeña cada uno en el proceso evolutivo?

2.1.2 Auto-organización y selección

Un tema central para el establecimiento de una teoría de la emergencia que dé cuenta de la estabilidad y flexibilidad de las estructuras y funciones biológicas es precisamente describir, en su generalidad, la relación existente entre los principios de auto-organización y selección natural, involucrados en el proceso evolutivo. Kauffman destaca que tal marco no existe aún, ni en la física, ni en la biología, ni en ningún otro lado; así, delinear tales leyes viene a ser parte de su proyecto. Esta relación, por principio de cuentas, la plantea en términos de una complementariedad: auto-organización y selección no se oponen o suplantán, se complementan. Partiendo de esta noción, Kauffman establece una prioridad no del todo bien definida, a saber, la de los principios auto-organizadores sobre la selección natural, lo cual supone un cambio radical¹⁵ a la luz del paradigma neo-darwinista vigente. Kauffman así lo expresa:

“La auto-organización puede ser la *precondición* de la capacidad misma para evolucionar. Sólo aquellos sistemas los cuales son capaces de organizarse a ellos mismos, espontáneamente, pueden ser capaces de seguir evolucionando. ¿Cómo comenzar a entender esta nueva unión? “Comenzar a entender” es todo lo que podemos esperar por ahora. Entramos a un nuevo territorio [...] Buscamos un nuevo marco conceptual que aún no existe. En ningún lugar, en la ciencia, tenemos una manera adecuada para plantear y estudiar la interrelación de la auto-organización, la selección, el azar, y el diseño. No tenemos un marco adecuado para ubicar tanto el lugar de las leyes en una ciencia histórica como el lugar de la historia en una ciencia de leyes”. [Kauffman 1995, pp. 185].

¹⁵ Se puede consultar un análisis del proyecto Kauffmaniano y su radicalidad en: Burian, R. M., Richardson R. C.: “Form and Order in Evolutionary Biology: Stuart Kauffman’s Transformation of Theoretical Biology”, *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 2, 1990, pp. 267-287. Así como también en: Richardson, R. C., “Complexity, Self-organization and Selection”, *Biology and Philosophy*, 16, 2001, pp. 655-683.

“Y así, nosotros volvemos a una posibilidad tentadora: que la auto-organización es un prerrequisito para la capacidad evolutiva, que ésta genera el tipo de estructuras que pueden beneficiarse de la selección natural [...] entonces, precisamente lo auto-organizado y resistente es lo que predominantemente vemos como siendo utilizado por la selección. Entonces no hay un conflicto necesario y fundamental entre auto-organización y selección. Estas dos fuentes de orden son compañeras naturales”. [Kauffman 1995, pp. 188].

Es pertinente señalar que por el momento no se discutirá sobre la supuesta radicalidad de este enfoque, más bien se definirá cuál es la línea que sigue el proyecto neo-emergentista emprendido por Kauffman. En este camino se ha llegado al supuesto de que la auto-organización es una precondition para la evolución misma, que el límite del caos es una transición de fase en la cual nuevos comportamientos y propiedades, tales como la vida o la creación de nuevas especies, pueden emerger, no importa que hablemos de la bacteria *E. coli* o de la coevolución de especies en un ecosistema, “el orden que emerge depende de las propiedades estables y típicas del sistema, no de los detalles específicos de su estructura y su función” [Kauffman 1995, pp.19]. Los principios de auto-organización en el proyecto Kauffmaniano son fundamentales.

2.1.3. La ruta hacia el orden.

El siguiente paso es poner en orden los planteamientos propuestos por Kauffman y dar una secuencia coherente a su proyecto. Para comenzar, el tema central de su investigación es: *el orden biológico*. Este orden biológico es para él un proceso emergente que obedece a leyes fundamentales, pues la selección natural y las variaciones al azar por sí mismas no logran dar cuenta convincentemente del orden observado en la naturaleza. Entonces, partiendo del gran tema que es el orden biológico, Kauffman trata de fundamentar una explicación de éste a partir de una teoría de la emergencia que sea capaz de proponer leyes biológicas elementales, busca generalidades, no detalles. Dichas leyes han de encontrarse en lo que él llama la nueva ciencia de la complejidad. Este campo de estudio investiga fenómenos alejados del equilibrio, caracterizados por sus relaciones no-lineales, sus procesos de realimentación, su alta sensibilidad a las condiciones iniciales, y su capacidad para crear nuevos patrones de comportamiento al encontrarse en un estado entre el caos y el orden

llamado *el límite del caos*. En este estado-región, se manifiesta el fenómeno llamado auto-organización que no es otra cosa que la coordinación del comportamiento complejo del sistema por parte de los elementos del mismo sistema sin estar en presencia de un poder central que regule y dirija la actividad de todos los elementos. Kauffman supone que el origen y la evolución de la vida no son fenómenos graduales y lineales como lo supone el paradigma vigente, por el contrario, los entiende como fenómenos complejos, no-lineales, y alejados del equilibrio. Desde esta perspectiva la auto-organización tiene un papel preponderante en la explicación del origen, mantenimiento, y diversificación de la vida.

El siguiente paso en el proyecto Kauffmaniano es relacionar los principios de auto-organización y selección natural. Para Kauffman no son fenómenos excluyentes, sino complementarios, pero también es cierto que él considera a la auto-organización como una precondition para la capacidad evolutiva, en otras palabras, la selección natural se beneficia de las estructuras estables y resistentes generadas a partir de la auto-organización, aunque tal relación, Kauffman lo acepta, apenas comienza a ser explorada, y preguntas del tipo: ¿cómo pueden tales leyes del orden emergente reconciliarse con las mutaciones aleatorias y la oportunista selección darwinista? y ¿cómo puede la vida ser contingente e impredecible mientras obedece leyes generales?, aún esperan una respuesta. Por último, en el plano más general, Kauffman argumenta que no importa que hablemos de la red auto-catalítica que dio origen a la vida; o de la transformación de una célula en un adulto gracias a las propiedades emergentes de las redes genómicas complejas; o del comportamiento de especies que coevolucionan en un ecosistema que genera pequeñas y grandes avalanchas de extinción y especiación, todos estos fenómenos obedecen a leyes complejas del orden emergente, leyes que están aún en espera de ser descubiertas. Se puede sostener que el proyecto de Kauffman es un lugar de partida, no uno de llegada.

El proyecto de Kauffman se puede resumir en las siguientes ideas centrales:

1. Identifica el tema del orden biológico como problema central y punto de partida de su investigación.
2. Pretende construir una teoría emergentista la cual dé cuenta del problema del orden biológico.

3. Espera descubrir leyes generales del orden emergente.
4. Utiliza las ciencias de la complejidad como fundamento para plantear tales leyes.
5. Explora la relación existente entre auto-organización y selección natural.
6. Sostiene que existen leyes fundamentales y complejas del orden emergente que rigen desde los fenómenos que dieron lugar al surgimiento de la vida hasta la regulación de la biosfera y la econosfera.

Con esto, se ha dado el primer paso en la apreciación del trabajo de Kauffman: la descripción general de su proyecto. A continuación se detallarán con mayor precisión sus aportaciones hechas al campo de la biología del siglo XXI.

2.2 Aportaciones a las teorías de la vida

El tema del origen de la vida se distingue por su carácter inter-disciplinario, ya que, entre otros campos, confluyen la astrofísica, la astrobiología, la química orgánica, la biología molecular, la geología, la paleontología, la teoría matemática, la teoría computacional, la filosofía, y algunos otros más. En este sentido, unificar los puntos de vista en torno a la problemática del origen de la vida resulta ser una tarea no menos que complicada. Por ejemplo, definir las condiciones ambientales que precedieron y favorecieron el desarrollo del primer sistema viviente es, por sí mismo, un tema completo de debate. Esto no quiere decir que el problema del origen de la vida es intratable o inaprensible, sólo plantea una diversidad, a todas luces, insoslayable. Dada esta diversidad, antes de describir las aportaciones que Kauffman ha hecho a este tópico en particular, es conveniente hacer una revisión –en ningún momento exhaustiva- del estado actual en el que se encuentran las investigaciones sobre el origen de la vida.

2.2.1 Teorías modernas del origen de la vida

En primer lugar, se puede aceptar que aunque no existe un consenso con relación a cómo definir el término vida, sí existe un acuerdo general sobre tres aspectos centrales: las características indispensables que debe poseer todo ser o sistema viviente, los estadios que debió seguir el desarrollo de la vida, y los requerimientos necesarios para que ésta pudiera surgir. Comenzando por el último punto, generalmente se acepta que existen dos requisitos primordiales para el desarrollo de la vida tal como la conocemos: la existencia de agua líquida y de polímeros orgánicos, como lo son los ácidos nucleicos y las proteínas. El agua líquida por sus propiedades únicas es un medio ideal para que tengan lugar las reacciones químicas, y los polímeros son necesarios para llevar a cabo las funciones biológicas centrales de replicación y catálisis [Bada 2004, pp.1]. Sobre el segundo punto, el origen y desarrollo de la vida se puede dividir en varias etapas: la época previa a la vida o

prebiótica¹⁶, la transición a una química primitiva de la vida (el mundo del pre-ARN), la evolución de una química elemental de la vida del mundo del pre-ARN a las moléculas auto-replicadoras del ARN (el mundo del ARN)¹⁷, y la evolución del mundo del ARN al mundo moderno de la bioquímica del DNA y las proteínas, las cuales fueron un ancestro común de la vida sobre la tierra [Bada 2004, pp.2]. Ahora, en referencia al primer punto y siguiendo a Rasmussen *et al.*, “un ensamblaje molecular localizado debe ser considerado como viviente si éste continuamente se regenera a sí mismo, se replica a sí mismo y es capaz de evolucionar” [Rasmussen *et al.* 2004, pp. 963]. Partiendo de este planteamiento, la pregunta obligada es: ¿qué serie de sucesos, en cada una de las etapas ya descritas, debieron acontecer para que se llevara a cabo una transición de la materia no viviente a la materia que es capaz de regenerarse, replicarse, y evolucionar? Como lo afirma Lahav *et al.*, “no existe un paradigma vigente sobre el origen de la vida” [2001, pp.77]. Pero, aunque se acepte el hecho de que tal paradigma no existe se pueden identificar, principalmente, dos corrientes que tratan de explicar la transición de lo no viviente a lo viviente.

Por un lado se encuentra la corriente heterotrófica o de la sopa prebiótica y, por otro, la corriente autótrofa o de la teoría metabólica (Dyson, 1985; Kauffman, 1993, 1995; Baltscheffsky *et al.*, 1997; McClendon, 1999; Wächtershäuser, 2000; Bartsev *et al.*, 2001; Lahav *et al.*, 2001; Bada y Lazcano, 2002; Berger, 2003; Bada, 2004). Bada resume la teoría de la sopa prebiótica y la teoría metabólica de la siguiente manera:

- a) “*La teoría de la sopa prebiótica*: Los componentes orgánicos que se encontraban en los océanos primitivos derivaron de una variedad de fuentes posibles, experimentaron la polimerización produciendo un incremento de macromoléculas complejas, algunas de las cuales, por azar, fueron capaces de catalizar su propia auto-replicación. Estas entidades simples auto-replicadas evolucionaron en otras de mayor complejidad y eventualmente en organismos con una bioquímica moderna.

¹⁶ La determinación de las condiciones que existieron en la etapa prebiótica engloba una serie de discusiones sobre el origen de los océanos: el papel que jugaron los impactos de meteoros y cometas sobre la tierra, la formación de la atmósfera primitiva, el origen del material orgánico que resulta fundamental para el surgimiento de la vida, etc. Una revisión de estos temas se puede encontrar en: Bada, L.: “How Life Began on Earth: A Status Report”, *Earth and Planetary Science Letters*, 226, 2004, pp. 1-15; y en: McClendon, J. H.: “The Origin of Life”, *Earth Science Reviews*, 47, 1999, pp. 71-93.

¹⁷ Existe cierto acuerdo entre la comunidad científica sobre el supuesto acerca de que el primer mecanismo genético no apareció con la molécula del ADN. Diversas propuestas han surgido en el sentido de que tal mecanismo se pudo encontrar en el mundo del ARN, o previo a él. Un planteamiento de esta postura puede consultarse en: Joyce, G. F.: “The Antiquity of RNA-Based Evolution”, *Nature*, 418, 2002, pp. 214-221.

b) *La teoría metabólica*: Un tipo primitivo de vida metabólica, caracterizada por una serie de reacciones auto-sustentadas basadas sobre compuestos orgánicos monoméricos, hechos directamente a partir de constituyentes simples (CO₂, CO), surgió en la cercanía de sistemas hidrotermales ricos en minerales. De acuerdo a esta teoría, en un principio, la vida no tuvo ningún requerimiento de moléculas informacionales (ADN, ARN, PNA, t-ARN etc.) En tanto el sistema de reacciones auto-sustentadoras evolucionó en complejidad, las moléculas genéticas fueron de alguna manera incorporadas a fin de, para una vida basada en el metabolismo, desarrollar una bioquímica tal y como la conocemos”. [Bada 2004, pp.2].

Una diferencia sobresaliente entre ambas corrientes radica en la postura que ambas asumen con respecto al requerimiento de las moléculas informacionales. La corriente heterotrófica sostiene que no puede haber vida si no se tiene un sistema genético primitivo; por el contrario, la corriente metabólica asume que tal sistema no es necesario para el surgimiento de la vida. Por ello, la teoría de la sopa prebiótica se desarrolla en términos de una concepción de la vida tal como la conocemos, esto quiere decir, “una vida basada en la química y la información” [Bada 2004, pp.3]. La disputa entre la necesidad o no de moléculas informacionales tiene que ver con el rol primordial que juegan las enzimas en la etapa prebiótica. Los heterotrofistas sostienen que la síntesis de enzimas durante la etapa prebiótica no es plausible, en otras palabras, asumen la inexistencia de catalizadores orgánicos durante esta época. Los autotrofistas requieren de un completo arreglo de moléculas interactuantes a fin de establecer un conjunto catalítico y alcanzar, así, una transición de fase en la cual la vida “cristaliza”. Para ellos hay abundancia de dichos catalizadores [Lahav *et al.* 2001, pp.85]. Por otro lado, existen propuestas que tratan de ubicarse entre ambas corrientes, como es el caso de la teoría de la emergencia de los patrones de información y funcionalidad (*ETIF: Emergence of Templated-Information and Functionality*) de Lahav *et al.* (2001).

Este breve resumen no tiene la intención de dar a entender que el único punto a debatir en el problema de la vida es el del requerimiento de moléculas informacionales, pero sí nos orienta hacia el punto que Kauffman considera como fundamental. Ya se apuntó con anterioridad que existen muchas diferencias en torno al problema del origen de la vida. Por ejemplo, no existe un acuerdo sobre cuáles eran las condiciones ambientales propicias para el surgimiento de ésta, no se sabe con exactitud de dónde proviene el agua de los océanos, cuál debió ser su temperatura ideal para que se llevaran a cabo las reacciones químicas,

cómo se formó la atmósfera y cuál era su composición, de dónde provino el material orgánico, cuál fue el primer mecanismo genético, cuál es el último ancestro común universal [McClendon 1999, pp. 71-93]. A partir de estas limitaciones, se puede apreciar que la reconstrucción histórica del origen de la vida es un problema del cual no se sabe si habrá una respuesta última y definitiva, pero muchos se muestran optimistas y están de acuerdo en afirmar que esto no representa impedimento alguno para que, en un futuro no muy lejano, pueda producirse en el laboratorio algún tipo de célula artificial, aunque dicha célula, cabe apuntar, no sea representativa de las entidades que aparecieron por primera vez sobre la tierra [Kauffman, 1995; Rasmussen *et al.*, 2004; Bada, 2004].

2.2.2 Kauffman y el origen de la vida

Las ramificaciones existentes con respecto al problema del origen de la vida, como se ha podido apreciar, son vastas. Gran parte de las teorías en boga son parciales, ya sea que se enfoquen a la síntesis prebiótica de los bloques constitutivos de los biopolímeros, a la formación de los ácidos nucleicos, o a la constitución y capacidad de encapsular moléculas orgánicas. Así mismo, aunque en menor grado, se han planteado teorías globales como lo es, por ejemplo, la teoría de la emergencia de los patrones de información y funcionalidad (ETIF) [Lahav *et al.* 2001, pp. 75-120]. La ventaja de las teorías parciales es su especificidad y grado de detalle. En este sentido, la propuesta de Kauffman debe entenderse como una teoría parcial del origen de la vida la cual, básicamente, se enfoca en la descripción acerca de cómo un sistema de reacciones químicas puede llegar a mostrar capacidades de auto-regeneración, auto-replicación y evolución.

La propuesta hecha por Kauffman se puede asimilar dentro de la corriente metabólica, siendo él reconocido como uno de sus más importantes exponentes [Lahav *et al.* 2001, pp. 85; Baltscheffsky *et al.* 1997, pp. 456]. Otros exponentes de esta corriente son: Freeman Dyson (1985), Günter Wächtershäuser (2000), y Bartsev *et al.* (2001) En términos generales, la teoría de los conjuntos auto-catalíticos de Kauffman establece que los primeros estados del origen de la vida fueron de carácter metabólico (reacciones químicas), y que el sistema genético fue introducido en una etapa posterior, producido por el sistema

metabólico. Así, la vida es una propiedad que se produce por la interacción de una diversidad de moléculas que cruzan cierto umbral de complejidad. De este modo, la vida no se encuentra en las propiedades de una molécula en particular ya sea que se hable del ADN, el ARN, u otro precursor de la maquinaria genética, la vida es una propiedad emergente del sistema de moléculas en interacción, no reducible a ninguna de sus partes. Kauffman lo expone reiterativamente de la siguiente manera:

“ Creo que la vida misma es un fenómeno emergente, pero no quiero decir nada místico con ello [...] La vida es un fenómeno emergente que surge en tanto que la diversidad molecular de un sistema químico prebiótico va más allá de cierto umbral de complejidad. Si esto es verdad, entonces la vida no está localizada en las propiedades de ninguna molécula individual –en los detalles- sino que es una propiedad colectiva del sistema de interacción de las moléculas. La vida, desde este punto de vista, surgió completa y siempre ha permanecido completa. La vida [...] no está localizada en sus partes sino en las propiedades colectivas emergentes del *todo* que ellas crean [...] Ninguna fuerza vital o sustancia extra está presente en el *todo* auto-reproductor y emergente, sino que el sistema, en su colectividad, tiene una imponente propiedad no poseída por ninguna de sus partes. Es capaz de auto-reproducirse y evolucionar. El sistema colectivo está vivo. Sus partes son sólo químicos” [Kauffman 1995, pp. 24].

“Espero persuadirle de que la vida es una propiedad natural de los sistemas químicos complejos, que cuando el número de diferentes tipos de moléculas en una sopa química pasa cierto umbral, una red auto-sustentada de reacciones –un metabolismo auto-catalítico- repentinamente aparecerá” [Kauffman 1995, pp. 47].

“El secreto de la vida [...] no se encuentra en la belleza de la doble hélice de Watson y Crick, sino en el logro de una clausura catalítica colectiva” [Kauffman 1995, pp. 48].

Un organismo viviente es un sistema químico que tiene la capacidad de catalizar su propia reproducción [Kauffman 1995, pp. 49].

[...] “la vida emergió como una transición de fase en sistemas de reacción suficientemente complejos” [Kauffman 1996a, pp. 31].

Kauffman asume que la propiedad llamada vida no comienza con la maquinaria genética del ADN descrita por Watson y Crick (1953), ni con la del ARN descrita por Joyce (1989), Eigen (1971) y Eigen y Schuster (1979). El argumento central en contra de la molécula de ADN como primer sistema auto-replicante es que, aun siguiendo el modelo de Watson y Crick en el que cada hélice especifica la secuencia de nucleótidos de la hélice complementaria, no es posible llevar a cabo este proceso en ausencia de un conjunto de enzimas (proteínas), no hay auto-replicación en ausencia de catalizadores. El ADN desnudo no se auto-replica [Kauffman 1995, pp.38]. Si el ADN no califica para ser la primera

molécula poseedora de una maquinaria genética, algunos investigadores han sostenido que el ARN pudo serlo. Kauffman [1995, pp. 38-43] expone cuatro razones por las cuales no es plausible tomar el ARN o algún otro sistema genético previo como las moléculas precursoras de la vida.

En primer lugar, muestra que si se prescinde de catalizadores para realizar la auto-replicación, al igual que con el ADN, los nucleótidos que forman el ARN¹⁸ no pueden desempeñar el emparejamiento descrito por el modelo de Watson y Crick, esto debido al comportamiento específico de los nucleótidos base. Si se toma una cadena formada, por ejemplo, con 10 nucleótidos de la misma base, en este caso guanina (G), la cadena de guanina tiende a enroscarse sobre sí misma. El resultado es una madeja que resulta incapaz de actuar como un patrón para la auto-réplica.

El segundo argumento se refiere a la posibilidad de que ocurra lo que se conoce como un error-catástrofe. Aun suponiendo que se pudiera evitar el enroscamiento de la cadena formada por el nucleótido base G y pudiera desarrollarse el proceso de copiado, es posible la ocurrencia de un error en la réplica, lo cual equivaldría, por ejemplo, a poner una G en lugar de una C. Ello provocaría que se corrompiera el mensaje genético. A esto se le llama un error-catástrofe. En las células estos errores son mantenidos al mínimo por enzimas correctoras que aseguran la fidelidad de las copias. Sin enzimas para evitar el enredo de la guanina, las fallas de las copias, y otros errores, un mensaje de ARN, por sí mismo, podría llegar a ser rápidamente un sinsentido.

En tercer lugar, si las enzimas son absolutamente necesarias para la replicación, entonces aquellos que creen que el ARN fue primero –punto de vista predominante- deben buscar formas en las cuales los mismos ácidos nucleicos son capaces de comportarse como catalizadores. Thomas Cech (1986, 1989) descubrió que las mismas moléculas del ARN pueden actuar como enzimas y catalizar, así, las reacciones. Tales secuencias de ARN son

¹⁸ El ARN (ácido ribonucleico) se compone de cuatro nucleótidos base: adenina (A), citosina (C), guanina (G) y uracilo (U). Puede existir como una doble hélice, y al igual que en el ADN cada hélice es un patrón complementario en donde los nucleótidos se corresponden: A-U, C-G. En la célula, la información para hacer una proteína es copiada del ADN a una hélice del llamado ARN mensajero y es transportada a las estructuras llamadas ribosomas (maquinaria que cumple la función de traducir el código genético). En este sitio, con la ayuda del ARN transferente, la proteína es fabricada.

llamadas ribozimas. Cuando el mensaje del ADN –las instrucciones para hacer proteínas– es copiado sobre una hélice del ARN mensajero, cierta cantidad de información es ignorada. Así, las células tienen no sólo enzimas correctoras, sino enzimas editoras. La parte de la secuencia que contiene las instrucciones genéticas, los exones, deben ser separados de las secciones que no tienen sentido, los intrones. Cech descubrió que en algunos casos ninguna enzima proteínica es necesaria para la edición. La secuencia misma de ARN actúa como una enzima, cortando sus propios intrones. Entonces, una ribozima puede actuar como una enzima y catalizar la reproducción de las moléculas de ARN o bien puede actuar sobre sí misma y auto-reproducirse. En cualquier caso existe una molécula auto-reproductora. El problema al que se enfrenta esta hipótesis llamada ribozima polimerasa¹⁹ es a uno del tipo error-catástrofe, descrito anteriormente. La razón es que, aunque tal ribozima puede producir lo que se llama un gen desnudo replicante, la ocurrencia de un error, esto es, la copia incorrecta de un nucleótido, es inevitable. La ribozima auto-replicante, en ese sentido, producirá variaciones mutantes que serán menos eficientes que las normales, lo cual provocará que existan errores con mayor frecuencia, y tales errores se multiplicarán copia tras copia. En lugar de una acumulación de mejoras se produce una acumulación de errores que, en el transcurso de varios ciclos, conduce a las secuencias del ARN a ser un sistema catalítico inerte.

Por último – y para Kauffman el argumento de mayor peso– se encuentra el siguiente: todos los sistemas vivos parecen tener una complejidad mínima por debajo de la cual es imposible ir. Ni la hipótesis de los genes desnudos del ARN, ni la de la ribozima polimerasa ofrecen una explicación profunda de la complejidad mínima observada en todas las células libres vivientes. Es precisamente este argumento el que en mayor parte soporta su teoría de los conjuntos auto-catalíticos, la cual se detallará a continuación.

¹⁹ Polimerasa se le llama a las enzimas proteínicas que logran la fina discriminación de nucleótidos, esto es, si una cadena de ARN está formado por las bases UAGGCCUAAUUGA, entonces su complemento resulta ser AUCCGGAUUAACU, de esta forma la función de la polimerasa es elegir correctamente el nucleótido correspondiente: A-U, C-G.

2.2.3 La teoría de los conjuntos auto-catalíticos

La noción de conjuntos auto-catalíticos, sugerida en primera instancia y de manera independiente por Kauffman (1971), Eigen (1971), y Rossler (1971), ha ido cobrando cada vez mayor fuerza, debido al soporte teórico y experimental recientemente desarrollado. Hordijk y Steel (2003), han avanzado en el trabajo de la detección de conjuntos auto-catalíticos en sistemas de moléculas virtuales simuladas por ordenador, desarrollando un algoritmo para tal efecto, así como también han investigado el rango de catálisis requerido para la emergencia de tales conjuntos; Krishna (2003), y Jain y Krishna (1999), han trabajado tanto en la descripción de las propiedades matemáticas de los conjuntos auto-catalíticos como en el estudio de su propia formación y destrucción, ello sobre la base de modelos simulados de redes evolutivas; Mitsuzawa y Watanabe (2001), han investigado la emergencia y continuo crecimiento de estos conjuntos; Lee *et al.* (1996, 1997) y Yao *et al.* (1998), han aportado evidencias experimentales sobre la posibilidad de la auto-replicación de sistemas químicos basados en péptidos²⁰, esto es, evidencia sobre la formación de conjuntos auto-catalíticos no sólo en los ordenadores, sino también en el laboratorio. Hechas estas precisiones, el siguiente paso es explicar qué es un conjunto auto-catalítico y cuál es su dinámica.

Siguiendo a Jain y Krishna [1999, pp. 117], y Krishna [2003, pp. 43], un conjunto auto-catalítico es el subconjunto de las especies que contienen los catalizadores requeridos por todos sus miembros. En términos de los modelos de gráficas aleatorias²¹, es una gráfica en la cual cada uno de sus nodos tiene, al menos, una entrada que está ligada a otro nodo perteneciente a la misma gráfica. La figura 1 muestra varios ejemplos de conjuntos auto-catalíticos

²⁰ Péptido se le llama a la unión que resulta de dos grupos de aminoácidos: carboxilo y amino. Los péptidos más simples consisten de dos aminoácidos residuales y se llaman dipéptidos. Aquellos que contienen tres o más aminoácidos residuales se llaman polipéptidos. En general, a un péptido natural de 50 o más aminoácidos residuales se le conoce como proteína. Muchas proteínas están formadas de largas cadenas polipéptidas constituidas por cientos y cientos de aminoácidos conectados unos a otros por uniones péptidas. Cf. Nason, A.: *Biología*, México, Limusa, 1968.

²¹ Una gráfica aleatoria es un conjunto de puntos, o nodos, conectados de manera aleatoria por un conjunto de líneas.

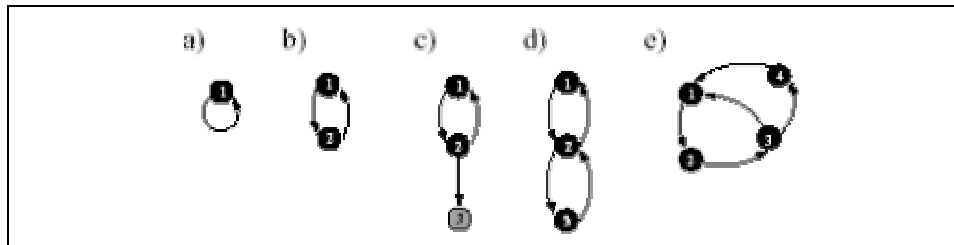


Figura 1. Ejemplos de conjuntos auto-catalíticos.

En otras palabras, un conjunto auto-catalítico es un sistema de moléculas que, en su interacción, pueden actuar como catalizadores para las reacciones y como productos de ellas. Así, las moléculas desempeñan un papel dual: pueden servir ya sea como ingrediente (sustrato) o producto de una reacción, y también como catalizadores para otra reacción. Esta dinámica permite el desarrollo de ciclos de clausura catalítica. Kauffman establece de la siguiente manera las condiciones para que un sistema contenga un subconjunto auto-catalítico:

“primero, un conjunto de moléculas deben de estar conectadas por reacciones catalizadas y, segundo, las moléculas de este conjunto deben, para efectos de su formación, ser catalizadas por otras moléculas, llamadas moléculas-comida, pertenecientes al mismo conjunto o añadidas desde fuera de éste” [1995, pp. 60-61].

Habiendo definido lo que es un conjunto auto-catalítico no hay que perder de vista lo que se pretende explicar con él. Por una parte, aquello que se quiere responder es cómo un sistema de reacciones químicas puede auto-sostenerse, esto es, mantener la dinámica que lo produce, y, por otra, indicar de que manera un conjunto de moléculas puede lograr auto-replicarse. Además de esto, debe aclararse cómo tales capacidades tuvieron lugar en un lapso razonable de tiempo. Siguiendo estos tres hilos conductores, a continuación se describirá de qué manera la teoría de los conjuntos auto-catalíticos de Kauffman, sobre la base de un sistema de reacciones químicas basadas en la síntesis de cadenas péptidas, ofrece respuestas a tales planteamientos.

Kauffman explica la dinámica de los conjuntos auto-catalíticos en términos de gráficas aleatorias construidas por hilos y botones –lo que él llama un problema de juguete- en

donde los botones corresponden a los nodos y los hilos a las interacciones o uniones entre ellos. Propongo que imaginemos un conjunto de 10,000 botones esparcidos sobre el piso. En forma aleatoria hay que escoger dos de ellos para unirlos por medio de un hilo. Hecho lo anterior se depositan los botones sobre el piso. Nuevamente se vuelven a tomar otros dos botones de manera aleatoria para unirlos con otro hilo y colocarlos, de nueva cuenta, en el piso. En tanto se repite una y otra vez esta acción, al principio existe una gran probabilidad de tomar botones que no han sido aún escogidos, pero después de ciertas repeticiones, esta probabilidad disminuye, de tal suerte que, al tomar aleatoriamente un par de botones, uno de ellos estará unido ya a otro, y de este modo se tendrán tres botones unidos. Si se continúa con este proceso, pronto los botones llegarán a estar interconectados formando grandes cúmulos. La figura 2 muestra un ejemplo de ello.

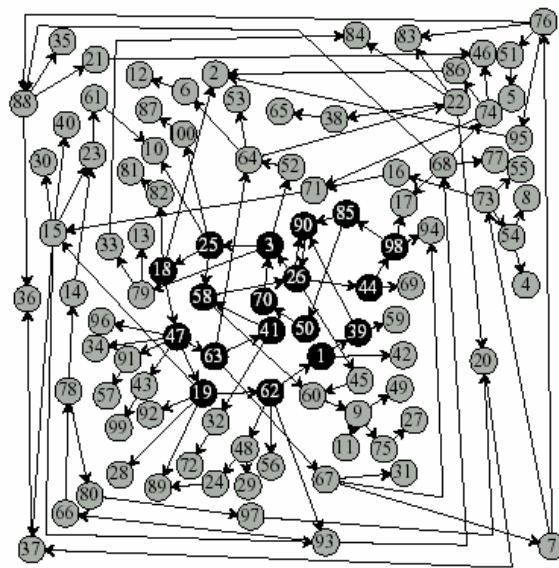


Figura 2. Gráfica aleatoria de un conjunto auto-catalítico. Krishna [2003, pp. 83]

Una característica importante de las gráficas aleatorias es que muestran un comportamiento estadístico regular en tanto se ajusta la proporción entre hilos y botones (nodos y uniones). Una transición de fase ocurre cuando la proporción entre uniones y nodos sobrepasa el valor de 0.5. En este punto, un gran cúmulo súbitamente se forma. En el caso de los 10,000 botones, el gran cúmulo surgirá cuando se arribe alrededor de los 5,000 hilos. El rango de crecimiento disminuirá en tanto el número de botones y pequeños componentes, que

permanecen aislados, decrece [Kauffman 1995, pp. 56]. Kauffman resume este proceso de la siguiente manera:

“La intuición que yo quiero que usted se lleve, partiendo de este problema de juguete, es simple: en tanto que la proporción entre hilos y botones aumenta, rápidamente una gran cantidad de botones se conectan, de tal suerte que se forma una vasta red de botones en el sistema. Este gigantesco componente no es un misterio; su emergencia es la natural y esperada propiedad de una gráfica aleatoria. El caso análogo en la teoría de la vida será que cuando un número lo suficientemente grande de reacciones son catalizadas en un sistema de reacciones químicas, una vasta red de reacciones catalizadas cristalizará rápidamente. Tal red, resulta, es casi auto-catalítica –casi con toda certeza auto-sustentada, viva” [Kauffman 1995, pp.58].

Pasando ahora de los botones e hilos a las moléculas y las reacciones químicas, utilizando las gráficas aleatorias, lo que sucede es lo siguiente:

[...] en tanto que la diversidad de moléculas en nuestro sistema se incrementa, la proporción entre reacciones (uniones) y químicos (nodos) llega a ser mayor. En otras palabras, la gráfica de reacción tiene más líneas conectando químicos. Las moléculas en el sistema son, ellas mismas, candidatas para ser capaces de catalizar las reacciones por las cuales las moléculas mismas son formadas. En tanto la proporción entre reacciones y químicos se incrementa, el número de reacciones que son catalizadas por las moléculas en el sistema se incrementa. Cuando el número de reacciones catalizadas es cercanamente igual al número de químicos, una red gigante de reacciones catalizadas se forma, y un sistema auto-catalítico colectivo llega a existir. Un metabolismo viviente se cristaliza. La vida emerge en una transición de fase” [Kauffman 1995, pp. 62].

Recapitulando: un conjunto auto-catalítico es un sistema de moléculas en el cual éstas mismas pueden actuar como sustrato para la reacción o como catalizadores de ellas, todo esto con el aporte constante de moléculas-comida o alimentadoras. Las moléculas forman ciclos de realimentación dentro de un mismo grupo de moléculas, llámese a éste local. Es importante notar que existen dos factores importantes para que surja una transición de fase en una red auto-catalítica de reacciones, estos son: por un lado, la diversidad de moléculas, y por otro, la probabilidad de que cualquier molécula pueda catalizar cualquier reacción. Al primer factor se le distingue con la letra M, al segundo con la P. Como ya se vio, una transición de fase ocurre cuando la proporción entre nodos y uniones es mayor a 0.5, y menor a 1. Esto se puede alcanzar ya sea variando M, o variando P. Este sistema es auto-sustentable porque produce la dinámica que, a su vez, produce al mismo sistema, y auto-replicante porque las moléculas producen otras moléculas que ayudarán a las primeras a

producirse. En ausencia de una mínima diversidad de moléculas o de un número mínimo de uniones, el sistema sería una sopa inerte de reacciones que transcurrirían con una lentitud incapaz de producir, hasta el momento, la vida que abunda en la biosfera.

Hasta este punto, la noción de conjuntos auto-catalíticos muestra la dinámica por la cual un conjunto de moléculas puede auto-mantenerse y auto-replicarse, logrando llevar a cabo esta propiedad en un lapso razonable de tiempo, a razón de la catálisis que acelera los procesos de reacción. Pero otra propiedad debe ser explicada a partir de la auto-catálisis: la auto-reproducción. Para ello, es necesario que el sistema esté contenido en una membrana²². Cabe resaltar que Kauffman no explica como se llevó a cabo este proceso de compartimentalización, sin embargo, lo supone indispensable. Siguiendo con el argumento, la compartimentalización o encapsulamiento es esencial para evitar la disolución de las moléculas reaccionantes. Un sistema auto-catalítico pudo crear y ser constituido en una membrana bilípida. Para Kauffman, ya que los constituyentes moleculares del sistema se recrean a sí mismos, el número de copias de cada molécula puede incrementarse hasta que el total llega a ser el doble. El continúa:

“El sistema puede romperse en dos coaservados, dos membranas bilípidas u otra forma compartimentalizada. De hecho, tal división en dos ocurre espontáneamente en tanto que tales sistemas aumentan en volumen. Así, nuestra protocélula auto-catalítica, ahora, se ha auto-reproducido. Un sistema químico auto-reproductor, vivo por este criterio, viene a existir” [Kauffman 1995, pp.66].

En resumen: Kauffman asume que un sistema viviente surge a partir de que un conjunto auto-catalítico de reacciones cruza cierto umbral de complejidad, haciendo posible el auto-mantenimiento, la auto-replicación, y la auto-reproducción en un rango plausible de tiempo. Para el surgimiento de la vida no fue necesario el surgimiento previo de ninguna maquinaria genética. La vida no se encuentra en una molécula particular, ya sea en el ADN, el ARN, o incluso en algún polipéptido o proteína. No es una propiedad cuyo ensamble se ha llevado a cabo pieza por pieza, emerge completa y de una sola vez en una transición de fase. Su teoría sobre el origen de la vida es de carácter holista, pero no nace del misticismo,

²² Determinar cómo se creó el primer contenedor para las reacciones químicas que dieron origen a la vida es, por sí mismo, un problema mayúsculo. Una propuesta acerca de cómo pudo haberse formado la primera membrana se puede encontrar en: Trevor, J., T.: “Possible Origin of a Membrane in the Subsurface of the Earth”, *Cell Biology International*, 27, 2003, pp. 451-457.

como el afirma: “*nace del determinismo matemático*” [Kauffman 1995, pp. 69]. Kauffman define su postura holista de la siguiente manera:

“Immanuel Kant, habiendo escrito hace más de dos siglos, vio los organismos como *todos*. El *todo* existió por medio de sus partes; las partes existieron por, y a fin de, mantener el *todo*. Este holismo ha sido desprovisto de su papel natural en la biología, remplazado con la imagen del genoma como el agente central director que comanda la danza molecular. Un conjunto auto-catalítico de moléculas es, tal vez, la imagen más simple que uno puede tener del holismo de Kant. La clausura catalítica asegura que el *todo* existe por medio de las partes, y ellas están presentes por, y a fin de, mantener el *todo*. Los conjuntos auto-catalíticos exhiben la propiedad emergente del holismo” [Kauffman 1995, pp. 69].

Para Kauffman, la vida es una propiedad emergente y esperada del mundo físico, que tiene su explicación en las leyes físicas que gobiernan los sistemas complejos, pero ésta no se encuentra enraizada en los detalles ni en las particularidades químicas que ocurren en nuestro mundo, sino en las profundas raíces de las matemáticas mismas [Kauffman 1995, pp. 60]. La vida no se detiene en su simple emergencia, se desarrolla en un proceso de evolución biológica regido, desde la perspectiva Kauffmaniana, por la auto-organización y la selección natural. En este orden de ideas, la evolución biológica es el siguiente gran tema a tratar.

2.3 Aportaciones a la teoría de la evolución

Siglo y medio después de los trabajos que Darwin desarrolló acerca de la evolución biológica, continúa el debate entre aquellos que concuerdan y disienten con la afirmación referente a que la selección natural es el único mecanismo capaz de permitir estabilidad y flexibilidad en el proceso de adaptación evolutiva. La postura evolucionista clásica no explica por completo cómo, a partir de un proceso accidental consistente de simples mutaciones genéticas aleatorias y un mecanismo de selección, se ha podido desarrollar la inmensa variedad de especies vivientes que han habitado el planeta, la flexibilidad y estabilidad apreciada en los cambios adaptativos, así como la resistencia de la propiedad llamado vida que, una vez surgida, no ha desaparecido de la faz de la tierra.

Hacia finales del siglo pasado, el estudio de los sistemas caóticos proporcionó elementos que sugerían la formación de patrones de comportamiento coherentes a partir de sistemas ricos en entropía (Haken, 1977; Prigogine, 1977). Estos sistemas llamados “estructuras disipativas” o auto-organizados son lo suficientemente flexibles para permitir cambios en su estructura y suficientemente estables para no dejar que la estructura se destruya. Kauffman (1993, 1995) ha desarrollado modelos para el estudio de redes genómicas reguladas. Estos modelos llamados “redes booleanas” le han permitido estudiar sistemas biológicos dinámicos que pueden ir, dependiendo de sus interacciones, de un comportamiento ordenado a uno caótico. De su trabajo se desprende que una postura darwinista ortodoxa sobre la evolución resulta insuficiente, pues ésta atribuye a la selección natural un papel preponderante en la estabilidad y flexibilidad del proceso adaptativo y, además, no reconoce la importancia de la auto-organización para tales efectos. A partir del análisis de las redes genómicas reguladas por medio de las redes booleanas, y de sus resultados arrojados, Kauffman propone lo siguiente: 1) los sistemas adaptativos complejos evolucionan en un régimen en el límite o muy próximo al límite del caos; y 2) la auto-organización es precondition para la capacidad evolutiva.

2.3.1 Redes booleanas

La evolución requiere algo más que la simple habilidad para cambiar y transmitir variaciones heredables. Desde la perspectiva darwiniana, un sistema viviente debe, en primera instancia, ser capaz de mantener un compromiso interno entre flexibilidad y estabilidad. Para sobrevivir en un entorno variable, por una parte, un sistema viviente debe ser relativamente estable para estar seguro, pero no demasiado ya que podría permanecer por siempre estático, y por otra, el sistema no puede ser tan inestable de modo que la más ligera fluctuación química interna cause que la estructura completa se tambalee hasta el colapso. Considerando los conceptos del caos determinista²³, se puede apreciar que en los sistemas caóticos ligeros cambios en las condiciones iniciales pueden conducir al sistema

²³ Para una breve revisión de la noción de caos determinista consultar los apéndices contenidos al final de este trabajo.

hacia profundos disturbios. No hay razón para creer que una red, ya sea genética, celular o auto-catalítica, pudiera no ser hipersensible, caótica, degenerándose desde un principio. Cualquier cambio, por mínimo que éste sea, en la concentración del metabolismo interno, a razón de que alguna molécula de una célula vecina es absorbida, podría ser amplificado fuertemente de tal manera que la red se volvería completamente inestable. El potencial para el caos no es meramente teórico. Otras moléculas pueden adherirse a las enzimas en nuestras propias células, inhibiendo o incrementando su actividad. Las enzimas pueden ser “activadas” o “desactivadas” por otras moléculas en la red de reacciones. Es conocido que en la mayoría de las células tal retroalimentación molecular puede originar oscilaciones químicas complejas en el tiempo y en el espacio. El potencial para el caos es real. Si esto es así, entonces se requiere encontrar un recurso para el orden molecular, un recurso de homeostasis interna que proteja las células contra perturbaciones, un recurso que permita a las redes de protocélulas admitir ligeras perturbaciones sin colapsar. El estudio de las redes genómicas²⁴ reguladas en términos de redes booleanas ayudará a encontrar cuál es ese elemento que permite tal estabilidad y flexibilidad en el proceso adaptativo.

Las redes booleanas se caracterizan por ser un arreglo de elementos interconectados que pueden estar en uno de dos posibles estados de actividad: activos o inactivos. Si pensamos una red metabólica de enzimas, sustratos, y productos como una red de focos conectados por alambres, entonces una molécula catalizando la formación de otra molécula puede ser pensada como un foco que activa a otro foco. Pero las moléculas también pueden inhibirse unas a otras, esto puede ser entendido como un foco que desactiva a otro. Todos los focos pueden estar prendidos (activos) o apagados (inactivos) y entre estos límites toda una serie de combinaciones es posible. Si una red está, por ejemplo, compuesta de 100 nodos (N), cada uno de los cuales puede estar en dos estados de actividad (activos, inactivos), entonces el número de configuraciones posibles está dado por 2^N , en este caso 2^{100} . Tal rango de

²⁴ Existen tres diferentes aproximaciones teóricas que abordan el estudio de las redes genómicas reguladas. El primero construye modelos cinéticos detallados de pequeños circuitos genéticos aislados; el segundo, llamado de solución del problema inverso, usa arreglos de genes en los cuales conociendo los patrones de activación (activo, inactivo), o del incremento o disminución de la cantidad de proteínas, se puede deducir el circuito y la lógica que conduce a este comportamiento dinámico; el tercero es llamado “el planteamiento de conjunto” e incluye los modelos de las redes booleanas. Al menos tres conjuntos de redes booleanas, distinguidas por sus diagramas de conexión, están actualmente disponibles: las clásicas redes booleanas aleatorias, las redes de escala libre, y las redes medusa. Cf. Kauffman, S.: “The Ensemble Approach to Understand Genetic Regulatory Networks”, *Physica A*, 340, 2004, pp. 733-740.

posibles estados es llamado espacio de estados; en física clásica, espacio de fase. Podemos entenderlo como el universo matemático en el cual el sistema es libre de comportarse. Considerando una pequeña red de 3 nodos, esto es, de tres focos, cada uno de los cuales recibe entradas de los otros dos, digamos, el número de interacciones (K) es igual a 2, entonces su representación es la mostrada en la figura 4

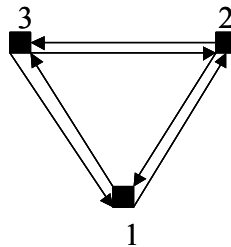


Figura 4. Diagrama de conexión de una red booleana de tres elementos

Las flechas muestran el flujo de la señal; así, las flechas que apuntan hacia el foco, a partir de los focos 2 y 3, indican que el foco 1 recibe entradas del foco 2, y del foco 3. En adición a esto, es necesario definir cómo cada foco responde a las señales que recibe. Construyendo una tabla de estados para cada foco o nodo de la red, se puede ver que el número de estados está dado por $2^2 = 4$. Las tablas de estado para cada foco son las siguientes:

2	3	1
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

"AND"

1	2	3
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

"OR"

1	3	2
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

"OR"

Tabla 1. Tablas de estado

Cada foco debe tener asignada una función booleana que puede ser de dos tipos: “AND” y “OR”. La función booleana “AND” significa que los focos 2 y 3 deben de estar activos antes de que el foco 1 se active. La función del tipo “OR” significa que para que el foco 1 se active en un tiempo T+1, el foco 2 ó el foco 3 ó ambos deben de estar activos en el momento T. Para ver como se comporta la red en un tiempo T+1, ver la tabla 2

T			T+1		
1	2	3	1	2	3
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1
1	0	1	0	1	1
1	1	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1

Tabla 2. Estado de actividad de la red en un tiempo T+1

El sistema puede estar en un número finito de estados, en este caso 8. Si comenzamos en un estado, al transcurrir el tiempo, el sistema fluirá a través de alguna secuencia de estados. Esta secuencia es llamada trayectoria. Como hay un número finito de estados, el sistema eventualmente llegará a un estado en el cual previamente se ha encontrado. Entonces la trayectoria se repetirá. Como el sistema es determinista, esta trayectoria se ciclará por siempre alrededor de un circuito recurrente de estados llamado “ciclo estable”.

Dependiendo del estado inicial en el cual comenzamos la red, éste seguirá varias trayectorias, cayendo en algún punto dentro de un ciclo estable que siempre se repite. El comportamiento más simple posible ocurriría si la red cae inmediatamente en un ciclo estable, conformado por un simple patrón de 1s y 0s. Un sistema que comienza en esa posición nunca cambia, entonces se dice que se ha detenido en un ciclo de longitud 1. Otra alternativa es que la longitud del ciclo sea el número total de estados posibles en el espacio de estados. Ahora, si tuviéramos una red con 1000 focos, su espacio de estados estaría dado por 2^{1000} . Si la red estuviera en un ciclo estable que pasara por cada uno de este hiperastronómico número de estados, y tomara una trillonésima de segundo cada transición de estado, no podríamos, en toda la vida del universo, ver al sistema completar su ciclo.

Hasta aquí se pueden hacer dos precisiones referentes a las redes booleanas. Primero, cada red se detendrá en un ciclo estable, pero el número de estados sobre tal patrón recurrente podría ser pequeño o inimaginablemente grande. Segundo, si un sistema cae en un ciclo de estado estable pequeño, éste se comportará de manera ordenada, pero si el ciclo es muy grande, el sistema se comportará de una manera que es esencialmente impredecible. De aquí que un sistema biológico deba evitar ciclos de estado de longitudes astronómicas y

procurar entrar en ciclos de estado pequeños. La pregunta es: ¿cómo sucede esto? Para responder a este cuestionamiento, primero hay que recurrir a la noción de atractor. Más de una trayectoria puede fluir en el mismo ciclo estable. Al comenzar una red con cualquiera de estos diferentes patrones iniciales, y después de pasar a través de diferentes secuencias de estados, éste se posicionará en el mismo ciclo estable, el mismo patrón de activaciones y desactivaciones. En el lenguaje de la dinámica de sistemas, el ciclo estable es un atractor y la colección de trayectorias que fluyen dentro de él es llamada contenedor de atracción.

Bajo las condiciones adecuadas, estos atractores pueden ser el recurso de orden en sistemas dinámicos de proporciones mayores. Como este sistema sigue trayectorias que inevitablemente fluyen dentro de atractores, los atractores pequeños atraparán el sistema en pequeñas subregiones de su espacio de estados. Entre el gran rango de posibles comportamientos, el sistema se fija en unos cuantos ordenados. El atractor, si es pequeño, crea orden. De hecho, los atractores pequeños son un prerequisite para la estabilidad y flexibilidad que muestran los sistemas biológicos que se pretenden simular con el modelo. Pero los atractores pequeños no son suficiente. Para que los sistemas dinámicos sean ordenados deben exhibir homeostasis, esto es, deben resistir pequeñas perturbaciones. Los atractores son el último recurso para la homeostasis, asegurando la estabilidad de un sistema. Pero la homeostasis no siempre surge. Si la red tuviera la propiedad de que todos sus atractores fueran inestables, o sea, que no resistieran la más ligera perturbación, cualquier cambio en la activación de uno de los focos enviaría al sistema hacia fuera de los atractores en un interminable e irrepitible viaje a través del espacio de estados. El sistema sería caótico. Las condiciones de estabilidad y flexibilidad observadas en los procesos adaptativos deben derivar, por tanto, de sistemas homeostáticos.

Lo que se requiere son leyes que describan qué tipo de redes serán probablemente ordenadas y cuáles probablemente caóticas. *El tipo de orden requerido no es aquel impuesto desde fuera del sistema, por la selección natural, sino que debe surgir dentro del sistema como una condición de la evolución misma.* Recapitulando: dos de los elementos utilizados para construir las redes booleanas pueden controlar el hecho de que el sistema se encuentre en un régimen ordenado, en un régimen caótico, o en una transición de fase entre estos dos estados. Uno de estos elementos es, simplemente, cuántas entradas controla cada foco. Si

cada foco es controlado por uno u otros dos focos, y la red no se encuentra densamente conectada, entonces el sistema exhibirá un gran orden. Si cada foco es controlado por muchos otros focos, entonces la red es caótica. Así que sintonizando la conectividad de una red se puede apreciar si su comportamiento es ordenado o caótico. El segundo elemento que controla la emergencia de orden y caos es simplemente la regla de control misma: “AND” y “OR”. Algunas reglas crean orden y algunas otras crean caos. Un punto adicional, si la red está densamente conectada, es posible determinar el parámetro P, este parámetro mide la inclinación de la mitad de 1s, y la mitad de 0s en una función booleana. Redes con un valor de $P = 0.5$, ó ligeramente mayor, son caóticas, y redes con un valor de $P = 1$, ó cercano a este valor, son ordenadas. Sintonizar el parámetro P conduce a las redes de regímenes caóticos a regímenes ordenados.

Resumiendo: las redes booleanas nos ayudan a explorar la región del espacio de estados en la cual se dan las condiciones de interacción que permiten la emergencia de patrones ordenados de comportamiento, esto es, la estabilidad y flexibilidad que son necesarias en el proceso adaptativo (Kauffman, 1995).

2.3.2 Evolución en el límite del caos

Consideremos redes en las cuales cada foco recibe entradas únicamente de otro foco. Siguiendo a Kauffman, en esta red con $K = 1$, no pasa nada interesante, pues cae rápidamente en un ciclo estable muy corto, tan corto que regularmente consiste de un único estado, un único patrón de iluminación. En el otro extremo, considerando redes en las cuales $K = N$ (significando que cada foco recibe una entrada de todos los demás focos, incluyendo el foco mismo), se puede deducir que la longitud de los ciclos estables de la red es la raíz cuadrada del número de estados. El número de atractores en una red está dado por N/e , donde e es el logaritmo natural 2.71828. Así que para una red de 100,000 variables binarias en donde $N = K$, habría alrededor de 37,000 atractores en el espacio de estados, lo cual es un número mucho menor que el total de estados posibles: $2^{100,000}$.

Si esta red es perturbada ($N = K$), cambiando la entrada de algún foco, tendremos una versión extrema del efecto mariposa. El sistema caerá bajo la influencia de otro atractor, pero como hay 37,000 atractores con una longitud de $10^{15,000}$ estados, la más mínima fluctuación cambiará completamente la evolución futura del sistema. *Redes con $K = N$, son masivamente caóticas. No puede existir ningún tipo de estabilidad ni orden espontáneo en este tipo de sistemas. No puede existir ningún tipo de variación heredable por mínima que sea para que la selección natural actúe sobre esta familia.* Aun en redes donde K es mucho menor que N ($K = 4$ ó $K = 5$), éstas exhiben comportamientos impredecibles y caóticos similares a aquellos mostrados en redes del tipo $K = N$.

El orden surge repentinamente cuando las redes toman el valor de $K = 2$. Para estas “bien portadas” redes, la longitud del ciclo estable no es la raíz cuadrada del número de estados, sino simplemente la raíz cuadrada del número de variables binarias. Para el caso de una red gigantesca con $N = 100,000$ y $K = 2$, el número de estados posibles es de $2^{100,000}$. De ahí que esta gigantesca red rápidamente se posiciona en un ciclo de 317 estados (la raíz cuadrada de 100,000). Esto quiere decir que es una fracción increíblemente mínima del total de estados posibles ($2^{100,000}$). El orden, la estabilidad, y la flexibilidad surgen espontáneamente a partir de una enorme red de interacciones aleatorias. En esta clase de sistemas, termodinámicamente abiertos, la dinámica espontánea conduce al sistema hacia una esquina infinitesimal de su espacio de estados, y lo mantiene ahí.

El orden se expresa por sí mismo en estas redes de diferentes maneras. Estados muy cercanos convergen en el espacio de estados. En otras palabras, dos patrones iniciales similares, probablemente, concurrirán en el mismo contenedor de atracción, de ahí conduciendo hacia el mismo atractor. Tales sistemas no muestran sensibilidad a las condiciones iniciales; no son caóticos. La consecuencia es la homeostasis buscada. Una vez que tal red está sobre un atractor, regresará al mismo atractor con una muy alta probabilidad, aun si ésta es perturbada. Por la misma razón, *estas redes pueden sostener una mutación que altera la lógica sin caer en la aleatoriedad.* La mayoría de las pequeñas mutaciones causan alteraciones ya esperadas en el comportamiento de la red. Contenedores y atractores cambian ligeramente. Tales sistemas evolucionan sin dificultad. Así, la selección no tiene que luchar para alcanzar la capacidad para evolucionar (*evolvability*). Lo

que se requiere es una red extremadamente compleja de elementos no densamente acoplados, interactuando. El cambio de un comportamiento caótico a uno ordenado es llamado transición de fase, dicha transición se encuentra en un valor de P cercano al valor de 0.5. En esta región, cercana a la transición de fase, cercana al límite del caos, los más complejos comportamientos pueden ocurrir –suficientemente ordenados para asegurar la estabilidad y completamente flexibles.

Lo que se busca en la gran cantidad de simulaciones generadas a partir de la sintonización de los parámetros K , N , y P es la localización en la red de la transición orden-caos. Para ello se utilizan elementos que distinguen regímenes ordenados de regímenes caóticos. Lo que se requiere es comprender el comportamiento del sistema completo, y no de trayectorias individuales. En regímenes caóticos, los estados iniciales similares llegan a ser progresivamente muy diferentes, comienzan a divergir más y más en el espacio de estados a lo largo de sus trayectorias. Este es el efecto mariposa: pequeñas perturbaciones se amplifican. De manera contraria, en un régimen ordenado, condiciones iniciales similares tienden a ser más similares, convergen cercanamente una de otra a lo largo del flujo de sus trayectorias. Esta es una expresión de la homeostasis. Lo que se mide es la convergencia o divergencia promedio a lo largo de las trayectorias de una red para determinar su localización sobre el eje orden-caos.

Lo que se ha encontrado a partir de las simulaciones realizadas por Kauffman y su equipo es que:

[...] “los sistemas adaptativos complejos se adaptan, mejoran, y evolucionan, no en el mismo límite del caos, sino en un régimen ordenado no muy alejado del borde del caos [...] Es muy prematuro para hacer una evaluación de la hipótesis de trabajo acerca de que los sistemas adaptativos complejos evolucionan en el límite del caos. Si probara ser verdad sería maravilloso. Pero es igualmente sorprendente si probara ser verdad que los sistemas adaptativos complejos evolucionan en una posición en algún lugar del régimen ordenado cercano al límite del caos. Quizá tal localización sobre el eje ordenado y estable, pero aún flexible, emergerá como un tipo de elemento universal de los sistemas adaptativos complejos en biología y más allá” [Kauffman 1995, 91].

2.3.3 Selección, auto-organización y paisajes de ajuste (modelos NK y NKC)

A partir de aquí se analizarán las limitaciones de una explicación evolucionista en términos únicamente de la selección natural. Para ello se recurrirá a las redes genómicas y a los modelos NK de paisajes de ajuste (o adaptativos) desarrollados por Kauffman.

Una de las más importantes presuposiciones de la tesis de Darwin es el gradualismo –la idea de que ciertas mutaciones en el genoma o genotipo pueden causar variaciones menores en las propiedades del organismo, esto es, en su fenotipo-. Además, se asume que estas mínimas, pero muy útiles variaciones pueden ser acumuladas “pieza por pieza” para crear el orden complejo encontrado en los organismos. No parece ser el caso de que el gradualismo siempre se mantiene²⁵. En algunos sistemas complejos, cualquier cambio, por mínimo que sea, causa cambios catastróficos en el comportamiento del sistema. En este caso, la selección no puede ensamblar los sistemas complejos. Ésta es una limitación fundamental para la selección natural. Pero existe una segunda limitación. Aun cuando el gradualismo se mantiene en el sentido de que ciertas mutaciones menores causan cambios menores en el fenotipo, no es una consecuencia que la selección pueda, con éxito, acumular esas mejoras menores. En lugar de esto puede ocurrir lo que es llamado un “error catástrofe”. Una población en adaptación acumula entonces una sucesión de catástrofes menores más que una sucesión de mejoras menores.

La noción de “fitness landscape” (ajuste o adaptación al paisaje) propuesta por Wright (1931, 1932), es una imagen de la evolución que se mueve a través de un paisaje formado de picos y valles. Un pico representa un ajuste (esto es, una adaptación) de un conjunto de genes (especies o agentes). Entre más alto es el pico, mayor es el ajuste de la colección de genes. Un valle representa un desastre en la evolución, esto es, muy bajos niveles de ajuste o malas adaptaciones. Entre más bajos son los valles, menores son las posibilidades de sobrevivencia. La adaptación es entonces entendida como un proceso de escalar los picos

²⁵ Sumados a la crítica del gradualismo se encuentran, también, Fontana y Shuster. Ellos sostienen que para distinguir entre el cambio evolutivo continuo y discontinuo, se requiere una relación de cercanía entre los fenotipos. Tal relación se basa sobre la probabilidad de que un fenotipo sea accesible desde otro a través de cambios en el genotipo. Cf. Fontana, W., Shuster, P.: “Continuity in Evolution: On the Nature of Transitions”, *Science*, 280, 1998, pp. 1451-1455.

más altos de las colinas del paisaje, y la selección natural es aquello que empuja a una población en adaptación hacia tales picos. Otra manera de ver esto es que la adaptación es un proceso de búsqueda donde el objetivo es moverse hacia fuera de los valles y subir hasta el tope del pico más alto, lo cual representa una adaptación óptima (Stacey, 2000).

Kauffman (1993, 1995) muestra cómo la dinámica de una red auto-organizada que consiste de un número de partes, entidades, o agentes (N), es determinada por el número (K), y fortaleza (P) de las conexiones entre las partes. Los genetistas llaman a este acoplamiento entre genes *epístasis*, este acoplamiento significa que ciertos genes en otros lugares del cromosoma afectan la contribución de ajuste de un gen en un lugar dado. Cuando el número de conexiones es bajo, la dinámicas de la red es caracterizada por atractores estables, cuando el número de conexiones es grande, los atractores tienen propiedades similares a las del caos matemático, o podrían llegar a ser completamente aleatorios. En un estado intermedio entre la estabilidad y la inestabilidad, la dinámica conocida como “el límite del caos” ocurre. En esta región-estado la novedad emerge de una manera radicalmente impredecible. Para Kauffman, el número y fortaleza de las conexiones entre agentes en un sistema causa los patrones de comportamiento de ese sistema (Stacey, 2000).

La rugosidad (*ruggedness*) de un paisaje, esto es, la aparición de más picos, se da alterando el número de interconexiones (K) entre los agentes (N). Esto se debe a que el organismo modelado, con su red de interacciones entre agentes, está atrapado en una red de restricciones en conflicto. Son estas restricciones en conflicto las que hacen un paisaje más rugoso y con muchos picos, lo cuál provoca una mayor cantidad de óptimos locales (Kauffman, 1995). Dado que hay una mayor cantidad de picos, y estos son de menor y similar tamaño, la adaptación se vuelve más difícil, debido a que existe una enorme cantidad de opciones o picos que pueden ser escogidos por los agentes para ser escalados. Ya que las opciones son muchas, sería imposible que los agentes exploraran todos los picos para escoger el de mayor altura y por consecuencia lograr la mejor adaptación, esto lleva a que los agentes queden atrapados en óptimos locales y no logren, así, su adaptación.

Cuando $K = 0$, el paisaje tiene un pico de gran tamaño rodeado de una planicie, este paisaje tiene un único óptimo global. Cuando esto ocurre, las restricciones en conflicto son

mínimas o no existen, esto hace que los competidores encuentren fácilmente la misma estrategia de supervivencia, eliminando así la ventaja competitiva. Cuando $K = N-1$, el paisaje es sumamente irregular con muchos picos y valles, no correlacionado, y en el que ningún tipo de movimiento predice lo que pasará con algún otro movimiento. Esto provoca que los agentes queden atrapados en óptimos locales, en picos de baja altura que producen una baja adaptación. En tanto que K se incrementa de 0 a $N-1$, existirá un punto crítico en el cual el paisaje será rugoso, pero no en demasía, y es aquí donde las oportunidades de una mayor adaptación y supervivencia para los agentes son mayores. Las restricciones en conflicto no serán tan numerosas, pero tampoco mínimas, y la red o paisaje no será ni estable ni inestable, moviéndose así hacia el límite del caos.

Kauffman (1993,1995) también desarrolló el modelo $NK[C]$ que describe la dinámica que surge cuando diferentes redes interactúan entre sí. Este modelo requiere tomar en cuenta el número de redes (S) y el número de conexiones (C) entre ellas. La estabilidad (esto es, paisajes poco rugosos) ocurre cuando (S) y (C) son bajas, y (K) alta. Las redes nunca terminan de coevolucionar cuando (S) y (C) son altas, y (K) es baja. En algún punto intermedio entre una alta (S) y (C), y una baja (K), por una parte, y una baja (S) y (C), y una alta (K), por otra, surge la dinámica de “el límite del caos”. Kauffman hace notar que tales redes de redes evolucionan de manera espontánea y auto-organizada en el límite del caos, donde éstas no son ni muy estables ni muy inestables. La dinámica experimentada por una sola red no es determinada simplemente por su propia dinámica interna, a saber, por su propia elección de (K), sino por el tamaño del sistema más amplio del que es parte, por las interacciones entre las redes, y por las interacciones entre los agentes. Altos niveles de interacción (K) producen caos cuando la red está aislada, pero estabilidad cuando interactúa (Stacey, 2000).

Ahora veremos las limitaciones de la selección en términos de los modelos NK . Si la riqueza de los acoplamientos (K) entre genes (epístasis) es muy alta y se aproxima al límite máximo $K = N-1$, el paisaje llega a ser completamente aleatorio. Nuevamente, para localizar el pico más alto o uno de los pocos picos más altos, se requiere buscar en el espacio completo de posibilidades. Para una longitud modesta del genoma, esto es simplemente imposible. Si una población en adaptación evoluciona solamente por mutación

y selección, ésta permanecerá “congelada” en una región infinitesimal del espacio total, atrapada por siempre en una región cualquiera. Hay una segunda limitación para la selección. No es sólo sobre los paisajes aleatorios que la selección falla. Aun sobre paisajes no rugosos, en la tierra del gradualismo, donde los supuestos de Darwin se mantienen, nuevamente la selección puede fallar por completo. La selección se precipita en un “error catástrofe” donde todas los caracteres útiles acumulados se disipan.

El comportamiento de la población depende del tamaño mismo de la población, el rango de mutación, y la estructura del paisaje. Si se supone el tamaño de la población y la estructura del paisaje como constantes, y se sintoniza el rango de mutación de lo más bajo a lo más alto, si el rango de mutación es muy bajo, entonces en un intervalo lo suficientemente largo surge una variante más ajustada, y rápidamente se propaga a través de toda la población. En el transcurso del tiempo la población escalará hacia algún óptimo local y permanecerá ahí. Si el rango de mutaciones es muy alto, la población se dispersará desde el punto inicial en el espacio genotípico y escalará en todas direcciones, en otras palabras, el rango de mutaciones es tan alto que causa que la población, desde el pico, se disgreguen más rápido que aquello que las diferencias selectivas entre los mutantes menos ajustados y los más ajustados pueden hacer para regresar a la población hacia el pico. Cuando se dice que la información genéticamente útil construida por una población se pierde al dispersarse la población alejándose del pico, se dice que se tiene un error catástrofe (Eigen y Schuster, 1978).

Recapitulando: la selección se enfrenta a dos limitaciones: ésta es atrapada o “congelada” en regiones locales de paisajes muy rugosos, y sobre paisajes muy lisos ésta sufre el error catástrofe descrito anteriormente, así, el genotipo llega a ser menos ajustado, esto es, menos adaptado. Dadas estas limitaciones, quizá otro recurso para el orden es requerido. En este sentido, Kauffman sugiere que *“la auto-organización puede ser la precondition para la misma capacidad evolutiva”*²⁶ [1995, pp. 185].

²⁶ Bedau y Packard también han trabajado sobre el tema de la capacidad evolutiva –la evolución de los índices de mutación- desarrollando un modelo para su estudio que consiste de un gran número de agentes en movimiento, reproduciéndose, y muriendo en un mundo bidimensional con recursos limitados. Sus resultados sugieren que: (1) el índice de mutación es un parámetro de control que gobierna una transición entre dos fases

De acuerdo a los modelos NK, sabemos que hay una relación entre la riqueza de las restricciones en conflicto en un sistema y la rugosidad del paisaje sobre el cual éste debe evolucionar. La selección lo que busca son “buenos” paisajes. No se ha determinado detalladamente que tipo de paisajes son buenos, aunque parece seguro sostener que tales paisajes deben ser altamente correlacionados, no aleatorios. La auto-organización genera el tipo de estructuras que se pueden beneficiar de la selección. Genera estructuras que pueden evolucionar gradualmente, que son resistentes, de ahí que hay una inevitable relación entre orden espontáneo, estabilidad, redundancia, gradualismo, y paisajes correlacionados. Los sistemas redundantes tienen la propiedad de que muchas mutaciones no causan, o sólo ligeramente, modificaciones en el comportamiento. La redundancia provoca gradualismo. Otro nombre para la redundancia es la resistencia o estabilidad. Las propiedades resistentes son aquellas que son insensibles a muchas alteraciones menores (ligeras). La resistencia es lo que le permite a los organismos ser moldeados por acumulaciones graduales de variaciones. Así, otro nombre para la redundancia es *la estabilidad estructural*. Las estructuras y los comportamientos estables son aquello que puede ser moldeado. Si esto es correcto, entonces lo que es auto-organizado y estable es lo que probablemente es utilizado por la selección [Kauffman 1995, pp. 188]. Estos dos recursos de orden son patrones naturales. Las redes genómicas yacen en un régimen ordenado, quizá cerca del límite del caos, porque tales sistemas son estructural y dinámicamente estables, así, ellos se adaptan sobre paisajes correlacionados y son capaces de ser moldeados. Esta es la estabilidad y flexibilidad descrita por los modelos, y observada en la naturaleza. Auto-organización y selección no se contraponen, al contrario, se complementan²⁷.

de evolución cualitativamente diferentes, una fase ordenada caracterizada por el equilibrio puntuado de la diversidad genética, y una fase desordenada caracterizada por fluctuaciones ruidosas alrededor de un equilibrio de la diversidad, y (2) la capacidad de la evolución para crear una estructura adaptativa es maximizada cuando el índice de mutación está sólo por debajo de la transición entre estas dos fases de evolución. Cf. Bedau, M., Packard N.: “Evolution of Evolvability Via Adaptation of Mutation Rates”, *BioSystems*, 69, 2003, pp. 143-162.

²⁷ En el congreso titulado “Los límites de la auto-organización en los sistemas biológicos”, patrocinado por el Centro de Estudios Avanzados para la Ciencia de la Vida en el Espacio, y por el Laboratorio de Biología de la Marina, ambos de los Estados Unidos, se discutió, ampliamente, el tema de la auto-organización. Entre los consensos que se alcanzaron en este encuentro se ubica el de la complementariedad que existe entre la auto-organización y la selección natural, postura que concuerda con la sostenida por Kauffman (1993, 1995). Cf. Blazis, D., “Introduction: The limits to Self-Organization in Biological Systems”, *Biological Bulletin*, 202, 2002, pp. 245-246.

El trabajo de Kauffman en el campo de la teoría evolutiva se puede sintetizar de la siguiente manera:

1) En redes en la cuales se fija el valor de $K = 1$, no pasa nada interesante, pues tales sistemas caen rápidamente en un ciclo estable muy corto, tan corto que regularmente consiste de un único estado, un sólo patrón de iluminación.

2) En redes con valores de $K = N$, no puede existir ningún tipo de estabilidad ni orden espontáneo. No puede existir ningún tipo de variación heredable, por mínima que ésta sea, para que la selección natural actúe sobre esta familia. Son masivamente caóticas. Aun en redes donde K es mucho menor que N , esto es, $K = 4$ ó $K = 5$, exhiben comportamientos impredecibles y caóticos similares a aquellos mostrados en redes del tipo $K = N$.

3) El orden surge repentinamente cuando las redes toman el valor de $K = 2$. En esta clase de sistemas termodinámicamente abiertos, la dinámica espontánea conduce al sistema hacia una esquina infinitesimal de su espacio de estados y lo mantiene ahí. Tales sistemas no muestran sensibilidad a las condiciones iniciales; no son caóticos. La consecuencia es la homeostasis buscada. Una vez que tal red está sobre un atractor, ésta regresará al mismo atractor con una muy alta probabilidad, aun si es perturbada.

Por la misma razón, estas redes pueden sostener una mutación que altera la lógica sin caer en la aleatoriedad. La mayoría de las pequeñas mutaciones causan aquellas “esperadas y agradadas” alteraciones (variaciones útiles) en el comportamiento de la red. Contenedores y atractores cambian ligeramente. Tales sistemas evolucionan sin dificultad. Así, la selección no tiene que luchar para alcanzar la capacidad para evolucionar (*evolvability*). Lo que se requiere es una red extremadamente compleja de elementos no densamente acoplados, interactuando.

El cambio de un comportamiento caótico a uno ordenado es llamado transición de fase, esta transición se encuentra en un valor de P cercano al valor de 0.5. En dicha región cercana a la transición de fase, cercana al límite del caos, los más complejos comportamientos pueden ocurrir –suficientemente ordenados para asegurar la estabilidad, y completamente flexibles. Este es el comportamiento mostrado por los sistemas biológicos.

Stuart Kauffman asevera que una postura darwinista que considera a la selección natural como el principal instrumento que hace posible toda estabilidad y flexibilidad en el proceso de evolución biológica, es insuficiente. Se sostiene que es insuficiente porque, en primer lugar, si el proceso de evolución es completamente aleatorio, se requeriría de un tiempo mucho mayor que el tiempo de vida del propio universo para poder explorar todo el espacio de posibilidades, y después de ello, discriminar entre los cambios más adaptados y los menos adaptados. En este sentido, la vida y su evolución se vuelven infinitamente improbables. En segundo lugar, porque si el rango de mutaciones es muy alto, la población se dispersará desde el punto inicial en el espacio genotípico y escalará en todas direcciones; en otras palabras, el rango de mutaciones es tan alto que causa que una población ya estabilizada cambie a un ciclo de trayectorias irrepetibles e inestables logrando con ello que las variaciones heredables conseguidas se disipen. Dadas estas limitaciones, otro recurso para el orden es requerido. En este sentido, se sugiere que la auto-organización puede ser la precondition para la misma capacidad evolutiva.

Auto-organización y selección no se contraponen, al contrario, se complementan. En esta complementariedad, el lugar que ocupa la selección natural en la explicación del proceso evolutivo debe ser replanteado ya que, por sí misma, no logra explicar coherentemente la estabilidad y flexibilidad de los sistemas biológicos; por otra parte, el lugar de la auto-organización debe ser revalorado, pues se han dado los primeros pasos para demostrar que la evolución de la vida se da en una transición de fase en el límite del caos, o cercano al límite del caos.

2.4 Aportaciones a las teorías de la complejidad.

Delineado el cuerpo del proyecto Kauffmaniano, y expuestas sus principales aportaciones al campo de la biología teórica: la mecánica que dio origen a la vida, y la dinámica evolutiva, el presente apartado pretende sintetizar las aportaciones que, a partir de las recientes teorías de la complejidad, Stuart Kauffman ha hecho a la biología del siglo XXI, mostrando con ello el por qué su trabajo debe ser considerado relevante.

Kauffman plantea la existencia de sutiles leyes de complejidad que explican una diversidad de fenómenos en la naturaleza, entre ellos, el origen de la vida y la dinámica evolutiva. En física hay auto-organización, pero no hay selección natural. En biología hay selección natural, pero se ha marginado el papel que puede jugar la auto-organización en la creación del orden biológico. Las propiedades de orden espontáneo exhibidas por los sistemas complejos y descritas por la física, no pueden ser ajenas o irrelevantes para la creación y el desarrollo de la vida. Hasta el momento, no existe teoría alguna o marco conceptual que combine la auto-organización y la selección natural. Es en esta coyuntura donde se manifiesta la importancia del trabajo de Stuart Kauffman, pues toma como tarea suya hacer el trabajo exploratorio de lo que podría ser tal teoría y expone una serie de argumentos que, sin lugar a dudas, ayudan a sentar las bases para una teoría evolutiva ampliada [Sober 1982, pp. 315-317].

En primer lugar, el mismo surgimiento de la vida es una expresión del orden espontáneo. Un sistema complejo de polímeros capaz de una acción y clausura catalítica se auto-organiza, produciendo así, un sistema auto-catalítico el cual es capaz de auto-mantenerse, auto-replicarse, y reproducirse, todo ello, en un lapso plausible de tiempo. La formación de conjuntos auto-catalíticos con el consiguiente surgimiento de las propiedades antes citadas, se ha alcanzado en simulaciones de ordenador, pero no sólo eso, el trabajo de laboratorio ha arrojado resultados positivos que muestran que la auto-replicación de sistemas químicos (la auto-replicación de péptidos) es un hecho [Kauffman 1996b, pp. 496-497]. De aquí, Kauffman sostiene que la vida emergió como una transición de fase en sistemas de reacción suficientemente complejos. Kauffman aportó a las teorías de la complejidad la noción de conjuntos auto-catalíticos.

Por otra parte, el orden espontáneo se hace patente, también, en la evolución y la capacidad evolutiva. En este sentido, Kauffman propone dos hipótesis fundamentales: 1) la auto-organización es precondition para la capacidad evolutiva, y 2) la evolución toma lugar en una zona de transición entre el orden y el desorden llamada “el límite del caos”. El dogma de las mutaciones genéticas al azar y la selección natural se enfrenta a dos limitaciones: 1) si la riqueza de los acoplamientos entre los genes es muy grande, la búsqueda de óptimos en un espacio de posibilidades de tamaño considerable hace que la exploración se detenga

en un óptimo local; además, 2) existe la posibilidad de incurrir en lo que se llama un error catástrofe, perdiendo así los caracteres útiles acumulados. De aquí que otro recurso para la evolución es necesario: la auto-organización.

Para analizar la dinámica evolutiva y el orden espontáneo, esto es, la auto-organización que se da en las redes genómicas, Kauffman desarrolló dos herramientas llamadas redes booleanas y los modelos NK y NKc. Estas herramientas han sido de gran importancia para el análisis de los sistemas adaptativos complejos, han permitido simular la dinámica de las redes genéticas y demostrar que la auto-organización es una propiedad que surge en una zona de transición ubicada entre un comportamiento homeostático y uno caótico que permite la estabilidad, pero, a la vez, la flexibilidad del sistema para crear la novedad y el orden observado en la naturaleza.

Capítulo 3: Implicaciones filosóficas de la obra de Stuart Kauffman.

Se ha expuesto en sus lineamientos generales el proyecto científico que Stuart Kauffman emprendió a partir de los últimos años de la década de los sesenta. El presente capítulo tiene por objeto hacer una valoración filosófica de su proyecto científico, pretendiendo, principalmente, determinar el grado de radicalidad de sus propuestas, lo cual no es otra cosa que identificar si sus contribuciones se acercan a lo que Kuhn llamó “un cambio de paradigma”, o, siguiendo a Lakatos, su proyecto es parte de un programa de investigación más amplio, o, finalmente, no se ajusta a ninguno de estos dos y es necesario buscar otro marco explicativo. Con esta tarea en mente, el primer paso será plantear la doctrina emergentista –a la cual se suscribe Kauffman- desde sus comienzos en las últimas décadas del siglo XIX y describir su evolución hasta la época actual. Enseguida, el siguiente paso a dar será ubicar el lugar que ocupan las aportaciones de Kauffman dentro de dicha doctrina, y determinar si éstas la amplían, la restringen, la refuerzan, o la reorientan, básicamente en dos planos: en su alcance epistemológico y en su alcance ontológico. Lo anterior servirá como base para, en un cuarto paso, valorar la radicalidad del proyecto Kauffmaniano y, por último, hacer una valoración general, entre ciencia y filosofía, de lo que el proyecto Kauffmaniano ha aportado en torno al problema del reduccionismo y antirreduccionismo en biología, y la relación existente entre la ciencia física y la ciencia biológica de cara al siglo XXI.

3.1 El emergentismo y su continuación en la obra de Kauffman.

El emergentismo tiene su origen en la disputa que, sobre la explicación del origen de la vida, en el siglo XIX, sostuvieron los defensores de las corrientes vitalista y mecánico/reduccionista. Siguiendo a Emmeche *et al.* [1997a, pp. 86-90], el fenómeno de la vida (en todas sus expresiones) –sentenciaban las doctrinas vitalistas clásicas del siglo XVIII- es animado por los espíritus de la vida. Estos espíritus son inexplicables e indescriptibles a partir de un punto de vista físico. Por el contrario, la posición

reduccionista (en el siglo XVIII) insistía en que el fenómeno de la vida era reducible a la física y la química, no así las funciones psicológicas de mayor nivel. Pero los puntos de discusión entre ambas corrientes sufrieron transformaciones al transcurrir los siglos XIX y XX. Debido a ciertos desarrollos científicos como lo fueron la prueba sobre la naturaleza eléctrica de los impulsos nerviosos (Schwann y Bois Reymond), la prueba acerca de la composición celular de las criaturas biológicas (Schwann y Schleiden), y la medición de la velocidad de los impulsos nerviosos (Helmholtz), entre otros, los vitalistas fueron restringiendo su postura. Por una parte, insistían en la irreducibilidad de las funciones psicológicas de mayor nivel y, por la otra, admitían que un amplio rango de fenómenos biológicos podían ser descritos científicamente. Pero aún sostenían la diferencia crucial entre materia orgánica e inorgánica, no porque los espíritus de la vida causaran cada uno de los hechos biológicos, sino porque determinaban la dirección evolutiva. Los espíritus de la vida llegaban a ser entidades teleológicas y conductoras. Todos los fenómenos del mundo – el reduccionismo sustentaba en oposición al vitalismo-, incluyendo los psicológicos de mayor nivel, eran reducibles a la física y a la química.

Eventualmente, la doctrina vitalista fue cayendo en desuso y un nuevo término comenzó a ser utilizado [Emmeche *et al.* 1997a, pp. 86]. El término fue acuñado con el nombre de emergencia o emergentismo. El emergentismo inglés, se puede decir, es reconocido como el principal cuerpo teórico que, en un principio, sirvió como base para tal doctrina o corriente filosófica. Fueron Samuel Alexander (1920), Morgan (1923), y C. D. Broad (1925), los principales exponentes de la noción de emergencia y del emergentismo inglés. Morgan [1923, pp. 2-3] aclara que el término “emergente” fue en primera instancia utilizado por G.H. Lewis (1875, Vol. II. Prob. V. ch. iii. p. 4-12) en su *Problemas de la vida y de la mente*, pero el concepto fue bosquejado en las leyes heteropáticas de la “Lógica” de J.S. Mill (1843 Bk. III. ch. 6, §2). Nociones análogas han sido encontradas en los escritos de G.E. Stahl, J.C. Reil, y C.A. Rudolphi, en el siglo XVIII

3.1.1 John Stuart Mill.

John Stuart Mill escribió:

Todos los cuerpos organizados están compuestos de partes, similares a las que componen la naturaleza inorgánica, y las cuales han existido, aun, en un estado inorgánico; pero el fenómeno de la vida, el cual resulta de la yuxtaposición en una cierta manera de aquellas partes, no guarda analogía con cualquiera de los efectos que deberían ser producidos por la acción de las substancias componentes consideradas como meros agentes químicos. Cualquiera que sea el grado en que nosotros pudiéramos imaginar nuestro conocimiento de las propiedades de los diferentes ingredientes de un cuerpo viviente para ser ampliado y perfeccionado, es cierto que la mera suma de las acciones separadas de aquellos elementos no explicarán nunca la acción del cuerpo viviente mismo. [(Mill, 1843 Bk.III, Ch. 6, §1) en O'Connor, 2002]

Mill introdujo la noción de efecto heteropático y la noción de ley heteropática, en contraposición con la de efecto y ley homopática, para distinguir dos modos de acción causal conjunta: el modo mecánico y el químico. La esencia del modo mecánico radica en que el efecto total de las diferentes causas actuando en conjunto es idéntico a lo que debería haber sido la suma de los efectos de cada una de las causas en su acción individual. Mill llamó a los efectos de las múltiples causas producidas por el modo mecánico, efectos homopáticos, y a las leyes descriptoras de tales relaciones causales, leyes homopáticas. Por otra parte, el modo químico de acción conjunta causal es caracterizado por una violación de la composición de las causas: la acción conjunta de las diversas causas actuantes en el modo químico no es la suma de los efectos de las causas que habían estado interviniendo individualmente. Mill llamó *heteropáticos* a estos efectos, y a las leyes causales que los describen, *leyes heteropáticas* [O'Connor, 2002]. Mill creyó en la existencia de leyes heteropáticas en la química y en la biología, mientras concebía que la psicología podía ser reducida a fisiología. Dentro de cada nivel, de cualquier forma, podían existir numerosas leyes homopáticas caracterizando las interacciones causales, las cuales obedecen a la composición de causas [O'Connor, 2002]. Mill explicó que las leyes heteropáticas de mayor nivel complementarían, pero no suplantarian las leyes de menor nivel (fueran homopáticas o heteropáticas).

En general, aunque Mill nunca utilizó el término “emergente” para hablar de los efectos y leyes heteropáticas, es posible apreciar la influencia que él ejerció sobre los trabajos

desarrollados por los emergentistas británicos, particularmente en lo relativo a la existencia de nuevas y genuinas propiedades emergentes, las cuales llegan a ser tales cuando ciertas entidades se relacionan de determinada manera, y cuyas propiedades tienen poderes causales no atribuibles a ninguna propiedad o evento anteriormente existente. Esta idea puede ser vista como un preludio de los trabajos realizados por Alexander, Morgan, y Broad, durante la segunda década del siglo XX.

3.1.2 Samuel Alexander

Samuel Alexander, en su obra *Espacio, tiempo y deidad*, propone –según Morgan lo describe [1923, pp. 9-10]- una jerarquía piramidal de 6 niveles de realidad emergentes, en cuya base se encuentra el espacio-tiempo como nivel constitutivamente fundamental; de él emergió la materia y de ésta la vida; en un proceso de evolución ascendente, de la vida emergió la mente o conciencia; como consecuencia del estado reflexivo de la conciencia emergen las cualidades terciarias como lo son, por ejemplo, los ideales de *verdad*, *belleza*, *ética*, y *valor*; por último, la cualidad de la deidad es, hasta el momento, la última propiedad emergente. Esta noción de niveles emergentes de organización o realidad, en especial el de la vida, se puede entender a partir de las palabras del propio Alexander:

“Los procesos físicos y químicos de una cierta complejidad tienen la cualidad de la vida. La nueva cualidad llamada vida emerge con esta constelación de procesos, y por eso la vida es a la vez un complejo físico-químico y no es meramente física y química, porque estos términos no caracterizan suficientemente el nuevo complejo, el cual, en el curso y orden del tiempo, ha sido generado a partir de ellos. Tal es la explicación dada al significado de cualidad como tal. La cualidad de mayor nivel emerge a partir de la de menor nivel de existencia y tiene su raíz dentro de, pero emerge a partir de, y no pertenece a ese nivel, pero constituye, aquello que posee tal cualidad, un nuevo orden de existencia con su ley especial de comportamiento. La existencia de cualidades, así descritas, es algo que debe ser admitido, como alguien diría, sobre la base de los hechos empíricos brutos, o, como preferiría decir en términos menos estrictos, debe ser aceptado con la “piedad natural del investigador”. Esto no admite explicación”. [Alexander 1920, pp. 46-47); en O’Connor, 2002].

“Un ser que conociera únicamente la acción física y química no podría predecir la vida; el debería esperar hasta que la vida emergiera con el curso del tiempo. Un ser que conociera únicamente la vida no podría predecir la mente [...] Entiendo que, dada la condición del universo en cierto número de instantes en términos de espacio y tiempo, el futuro entero puede ser calculado en términos de espacio y tiempo. Pero qué es lo

que éste será, qué cualidades tendrá más allá de lo espacial y temporal, él no las puede conocer a menos que las conozca ya, o hasta que él viva para ver”. [(Alexander 1920, pp. 327-328); en Pap 1952, pp. 303]

Alexander, concibe la realidad en términos de niveles, en este sentido, el concepto de emergencia explica la transición entre dichos niveles de realidad. A diferencia de los vitalistas, Alexander no se aparta de una explicación física determinista de lo que, para él, es una realidad emergente jerarquizada. No obstante, él, no logra explicar de que manera una cualidad superior surge a partir de una inferior, pero a la vez no es reducible a ésta última. Aunque el esfuerzo por desvitalizar la explicación del origen de la vida y los procesos de la conciencia fue de considerable importancia, no terminó por explicar cómo es posible el surgimiento de niveles de realidad, los cuales no son reducibles a aquellos de nivel inferior.

3.1.3 Morgan

Morgan –biólogo de formación- precisa lo que para él es la evolución emergente, retoma la distinción hecha por G.H. Lewis (1875) entre resultante y emergente, y expresa en su obra tres elementos comunes en la mayoría de las posturas emergentistas: la impredecibilidad, la irreductibilidad y la novedad. Para Morgan la evolución emergente implica la creación de novedades en el universo, la suya, es una teoría de la innovación que se despoja de los espíritus animistas. Para Morgan, al igual que para Alexander, un nivel de realidad mayor no puede existir en ausencia de un nivel precedente. Morgan expresa el espíritu de la evolución emergente de la siguiente manera:

“Evolución, en el amplio sentido de la palabra, es el nombre que damos al plan comprensivo de secuencia en todos los eventos naturales. Pero la secuencia ordenada, históricamente apreciada, hace aparecer en el presente, de tiempo en tiempo, algo genuinamente nuevo. Bajo lo que aquí llamo evolución emergente el énfasis está puesto en este advenimiento de lo nuevo. Ejemplos de esto existen en el surgimiento de la vida, en el surgimiento de la mente, y en el surgimiento del pensamiento reflexivo. Pero, en el mundo físico, la emergencia no es menos ejemplificada en el advenimiento de cada nuevo tipo de átomo, y cada nuevo tipo de molécula. Está más allá del juicio del hombre enumerar los ejemplos de emergencia. Pero si nada nuevo emerge, si sólo hay un reagrupamiento de eventos preexistentes y nada más, entonces, no hay evolución emergente” [Morgan 1923, pp. 1-2].

En el corazón del pensamiento de Morgan se encuentra la idea, en ocasiones confusa, del surgimiento de nuevas entidades y eventos, no meros arreglos de elementos ya existentes. Toma una posición ontológica al respecto, y no únicamente una epistemológica.

Resultante y emergente se refieren a lo que también Mill ya había definido como leyes y efectos homopáticos y heteropáticos. Resultante es el producto de la mera adición o sustracción de componentes, y predecible por esa razón; emergente es aquello que surge como nuevo y es impredecible a partir del conocimiento total de sus elementos constituyentes. Morgan explica la relación entre resultantes y emergentes así:

“Puede haber resultantes sin emergencia; pero no hay emergentes que no involucren, también, efectos resultantes. Las resultantes dan una continuidad cuantitativa que subyace sobre los nuevos pasos constitutivos en emergencia. Y el paso emergente, aunque éste pudiera parecer más o menos discontinuo, se explica mejor como un cambio cualitativo de dirección, o un cambio crítico, en el curso de los eventos. En ese sentido no hay discontinuidad, ruptura, hueco o hiato. Se puede decir, entonces, a través de las resultantes hay continuidad en progreso; a través de la emergencia hay progreso en continuidad.” [Morgan 1923, pp. 5]

En referencia a la tesis de la impredecibilidad, Morgan afirma que ella se refiere a la incapacidad de adelantar el tipo de relación que tendrá lugar entre eventos cualesquiera, y esto, se debe a que tales relaciones aún no existen. Lo resume de la siguiente forma:

“Sean tres niveles sucesivos de eventos naturales A, B, y C. Sea en B un tipo de relación, la cual no está presente en A; y en C un tipo de relación no presente aún en B o en A. Si uno viviera en, y tuviera experiencia sobre el nivel B, uno no podría predecir el carácter emergente del nivel C, porque las relaciones, de las cuales ellos son expresión, aún no han llegado a ser. Tampoco si uno viviera sobre el nivel A podría predecir el carácter emergente de los eventos de B, porque, *ex hypothesi*, aún no hay tales eventos. Lo que, se afirma, uno no puede predecir, entonces, es la expresión emergente de algún nuevo tipo de relación entre eventos preexistentes. Uno no podría predecir el carácter emergente de eventos vitales a partir, únicamente, del conocimiento más completo posible de los eventos físico-químicos, si la vida fuera un acorde emergente y no meramente debido a la suma, no obstante compleja, de las anotaciones constituyentes. Tal es la hipótesis aceptada en la evolución emergente.” [Morgan 1923, pp. 5-6]

Por otro lado, Morgan resume la posición mecanicista como una postura inaceptable, a la cual se opone el emergentismo evolucionista, acogiéndose para ello, como lo hiciera Alexander, a una “piedad natural”. Morgan expresa esta oposición en los siguientes términos:

“El elemento esencial de una interpretación mecanicista está en que ella se expresa en términos de efectos resultantes únicamente, calculables por sumas algebraicas. Ignora ese algo más, que debe ser aceptado como emergente. Hace referencia a los compuestos químicos solamente como una mezcla mecánica más compleja, sin ningún nuevo tipo de relación de sus constituyentes. Describe a la vida como un reagrupamiento de eventos físico-químicos sin ningún nuevo tipo de relación expresada en una integración, la cual parece, a la luz de la evidencia, marcar una nueva partida en el paso de los eventos naturales. Contra tal interpretación mecanicista – dogma mecanicista- surge en protesta la evolución emergente. La esencia de este argumento es que tal interpretación es completamente inadecuada. Hay resultantes; pero también hay emergencia. Bajo un tratamiento naturalista, sin embargo, la emergencia, en todos sus grados ascendentes, es lealmente aceptada, sobre la evidencia, con piedad natural [...] Pero que ésta pueda ser explicada únicamente invocando a alguna fuerza química, algún *elan vital*, alguna entelequia, en algún sentido extra-natural, nos parece que es una metafísica cuestionable”. [Morgan 1923, pp. 8-9]

En resumen: el emergentismo de Morgan toma distancia de las posturas vitalistas y asume una postura determinista, esto es, una continuidad causal del universo, cuya materialidad da origen a la vida. La materia es condición necesaria para el surgimiento de cualquier manifestación de vida; y la vida, para cualquier expresión mental. Estas dos propiedades emergentes, o cualquier otra, no pueden ser reducidas a sus meros componentes y no pueden ser predichas a partir del conocimiento total de sus constituyentes. La noción de evolución emergente de Morgan sostiene, como tesis central, el surgimiento de novedades en el universo. Emergencia para Morgan es: creación de nuevas propiedades.

3.1.4 D.C Broad

Broad, en su obra *Mind and its Place in Nature* se planteó la siguiente pregunta: “¿son de carácter último e irreducible las diferencias entre los comportamientos meramente físicos, químicos, y vitales, o no?” [Broad 1925, cap.II]. Para responder tal pregunta, Broad propuso tres alternativas teóricas. A la primera la llamó “*Teoría del Componente Especial*”. Esta teoría, representada por el vitalismo substancial, sostiene que un factor necesario para explicar el comportamiento característico de los seres vivos es la presencia, en ellos, de un componente peculiar llamado *entelequia*. Broad consideró insatisfactoria esta teoría porque era imposible explicar, con un mínimo de detalle, cómo un ser vivo podía estar compuesto por una estructura material compleja y una *entelequia*, dado que ésta, se suponía, no

correspondía a nada material [Broad 1925, cap. II]. A la segunda propuesta la llamó “*Teoría Mecanicista*”. Esta teoría, representada por el mecanicismo biológico, afirma que el comportamiento característico de los seres vivos puede ser deducido a partir de un adecuado conocimiento de las leyes físicas y químicas, a las cuales sus componentes obedecen, ya sea por separado o formando un complejo. Broad no descartó la validez de esta teoría, pero sí encontró en ella una limitación. Broad sostuvo que el mecanicismo biológico no podía mantenerse consistentemente sin una elaborada teoría deísta acerca del origen de los organismos. Este requerimiento deísta era, finalmente, para Broad, la limitante [Broad 1925, cap. II]. A la tercer propuesta, Broad, la llamó “*Teoría Emergentista*”. Esta teoría, representada por el emergentismo vitalista (así nombrado por él), enuncia que el comportamiento característico del *todo* no podría, aun en teoría, ser deducido a partir del más completo conocimiento del comportamiento de sus elementos, tomados por separado o en otras combinaciones. Él lo define con mayor precisión así:

“En términos abstractos, la teoría emergentista afirma que hay ciertos “todos”, compuestos (digamos) de constituyentes A, B, y C en una relación R uno con otro; que la totalidad de los “todos” compuestos de constituyentes del mismo tipo A, B, y C en relaciones del mismo tipo R tienen ciertas propiedades características; que A, B, y C son capaces de ocurrir en otros tipos de complejos en donde la relación no es del mismo tipo R; y que las propiedades características del “todo” R (A, B, C) no pueden, aun en teoría, ser deducidas a partir del completo conocimiento de las propiedades de A, B, y C en aislamiento o en otros “todos” que no son de la forma R (A,B,C). La teoría mecanicista rechaza el último enunciado de esta afirmación”. [Broad 1925, cap. II].

Para Broad, las propiedades características del *todo* no pueden ser deducidas a partir del completo conocimiento de las propiedades de sus constituyentes, porque no hay una ley de composición²⁸ general que determine las propiedades relevantes del *todo* sobre la base de las propiedades de sus componentes [Broad 1925, cap. II]. Con esto, Broad, sostiene que las propiedades emergentes son impredecibles; pero, para él, esta impredecibilidad no es constitutiva de la emergencia, sino más bien una consecuencia de la irreducibilidad metafísica de las propiedades emergentes.

²⁸ Una ley general de composición permitiría predecir las propiedades de cualquier compuesto químico cuando las propiedades de sus elementos, por separado, fueran conocidas. Por ejemplo, las propiedades del cloruro de plata podrían ser predecibles a partir del conocimiento de las propiedades del cloro y de la plata.

3.1.5 El emergentismo inglés y sus detractores en la primera mitad del siglo XX.

El emergentismo inglés es identificado, básicamente, en los nombres de Alexander, Morgan y Broad. La mayoría de las discusiones acerca de la propuesta emergentista se enfocan en los trabajos desarrollados por estos autores. Pero cabe agregar que entre ellos nunca existió un trabajo conjunto; por así decirlo, no formaron una escuela de pensamiento, y es difícil identificar a sus continuadores.

Una característica común entre todos estos teóricos es su visión acerca de una naturaleza formada por niveles de realidad unos más básicos que otros, pero no reducibles, cada uno de ellos, al más básico. Para el emergentismo inglés el nivel material es siempre condición necesaria para la emergencia de nuevas propiedades, rechazando con ello el vitalismo clásico. La incapacidad de predecir una característica emergente a partir del conocimiento absoluto de las propiedades de los elementos del sistema en que se manifiesta tal característica, es un lugar común en Broad, Morgan y Alexander. La novedad estricta en el universo es un rasgo característico del emergentismo inglés, expresado con mayor énfasis en la obra de Morgan. Por otro lado, un punto de debate que no fue puntualmente respondido por el emergentismo inglés fue el de la unidad de emergencia: ¿qué es aquello que emerge: leyes, entes, propiedades, cualidades? Esto es, no hubo una clara distinción entre lo que sería el emergentismo ontológico y el emergentismo epistemológico. En resumen: la postura emergentista de la década de los años veinte, en el siglo XX, se funda sobre cuatro principios, en donde el fisicalismo es el primero de ellos, y a partir de éste algo es emergente si y solo si: existe novedad; aquello que emerge no es predecible a partir del conocimiento de sus constituyentes; es irreducible a sus componentes mismos.

El emergentismo ayudo a reducir el misticismo que el vitalismo había provocado en la explicación de la vida y los fenómenos mentales al tomar como una tesis fundamental de su doctrina el fisicalismo. En las décadas comprendidas entre los años treinta y los años cincuenta se desarrollaron una serie de trabajos que pretendían aclarar y acotar el alcance de la teoría emergentista. Entre ellos se encuentran los de: Pepper (1926), Fawcett (1926), Reicer (1926), Lloyd (1927), Cunningham (1929), Baylis (1929), Ablowitz (1939),

Malisoff (1939, 1941), Henle (1942), Gotshalk (1942), Pap (1952), Berenda (1953), y Meehl y Sellars (1956).

Pepper en su ensayo de 1926 titulado “Emergencia” hizo una puntual crítica sobre el emergentismo, planteando un par de paradojas que resultaban de la postulación de la teoría emergentista. Pepper equiparó emergencia con cambio. Para él, en forma general, existen tres tipos de cambio: la ocurrencia del azar, que es la afirmación de una irregularidad cósmica; el cambio como reconfiguración²⁹, esto es, un cambio en el cual una característica reemplaza a otra; y la emergencia, que es un cambio acumulativo, un cambio cuyas características sobrevienen de otras. Para Pepper no hay duda, al hablar acerca de la noción de emergencia, no se discute sobre la posibilidad del azar cósmico, ni sobre la posibilidad del reemplazo de unas características por otras, sino sobre el hecho de que, aparte de los cambios en los cuales unas características reemplazan a otras, puedan existir, también, los cambios emergentes.

Pepper describe tres proposiciones fundamentales asumidas en la teoría de la emergencia :

“(1) Que hay niveles de existencia definidos en términos de grados de integración; (2) que hay marcas las cuales distinguen estos niveles unos de otros por encima y por debajo de los grados de integración; (3) que es imposible deducir las marcas de un nivel mayor a partir de las de menor nivel, y quizá también imposible deducir marcas de un menor nivel a partir de aquellas de mayor nivel”. [Pepper 1926, pp. 241]

De aquí sostiene que la primer proposición no es, en ningún sentido, objeto de controversia, no así la segunda, relacionada a la existencia de cambios acumulativos, y la tercera, referida a la impredecibilidad de tales cambios. Pepper propone lo siguiente:

Lo que deseo mostrar es que cada una de estas proposiciones son sujeto de un dilema: (1) el cambio emergente no es acumulativo o es un epifenómeno; (2) el cambio emergente es predecible como cualquier fenómeno físico o es un epifenómeno. Yo asumo que una teoría de un epifenomenismo indiscriminado es metafísicamente insatisfactoria. [Pepper 1926, pp. 241].

La sugerencia de Pepper, como se puede apreciar, es que la teoría de la emergencia no explica fenómenos inexplicables sobre la base de postura reduccionista, ya que –y los

²⁹ En el ensayo original, escrito en el idioma inglés, la palabra utilizada es shift, la cual significa: cambio, cambiar de sitio, mover, cambiar de. El tipo de cambio que Pepper tiene en mente es un tipo de cambio de configuración, o un cambio que tiene que ver con un arreglo distinto de las variables constituyentes.

emergentistas estarían de acuerdo en ello- replegarse a un epifenomenismo resultaría inaceptable. El argumento de Pepper, con respecto al primer dilema, se puede plantear, en resumen, así: si se tiene un nivel A con variables [a,b,c], la emergencia involucra el surgimiento de nuevas variables, entonces, un nivel B emergente es formado conteniendo las nuevas variables [d,e]. Existen dos opciones, estas nuevas variables tienen una relación funcional con las de menor nivel, o no la tienen. Si no tienen relación funcional son puramente un epifenómeno. Si tienen relación, entonces esas variables deben ser incluidas en el conjunto total de variables descritas por la relación funcional de menor nivel; esas variables emergentes deben tomar su lugar entre las variables de A como elementos de una reconfiguración de A. [Pepper 1926, pp. 242-243].

El segundo dilema lo plantea a partir de la siguiente interpretación del emergentismo:

“Lo que los evolucionistas emergentes quieren decir es que una ley emergente no puede ser deducida a partir de leyes de menor nivel, como los teoremas matemáticos pueden ser deducidos a partir de otros teoremas”. [Pepper 1926, 243]

Para Pepper si no hay ocurrencia de azar en el universo, es posible la existencia de un sistema cuyas leyes se pueden derivar a partir de una o unas cuantas más fundamentales, y de ahí, incluso, todas las demás. Pepper asume que los emergentistas no afirman la ocurrencia del azar en el universo, por tanto, deben aceptar la posibilidad de un sistema determinista clásico (conociendo la posición y velocidad de una partícula en un momento dado se podrá conocer su estado futuro). De aquí, el dilema a enfrentar por parte de los emergentistas, propone Pepper, es el siguiente: las leyes emergentes por las cuales argumentan no tienen efecto y son epifenómenos, o afectan y son capaces de ser absorbidas dentro del sistema físico. En otras palabras, si tienen efecto causal pueden ser explicadas en términos de leyes más fundamentales, lo cual, en última instancia, hace predecible todo hecho.

Cunningham (1929) afirma que la aportación de la teoría emergentista no radica en la insistencia sobre la aparición de lo nuevo, porque, en cierto sentido, la progresiva aparición de lo nuevo también ha sido admitida por las teorías mecanicistas y finalistas. Cunningham hace una importante distinción, aunque no entra en mayor detalle, sobre la

naturaleza de la emergencia, para él existen dos posibilidades: una emergencia *substancial* (ontológica), y una emergencia *estructural* (epistemológica). Así lo afirma:

“Por un lado, uno puede sostener que lo emergente es de la naturaleza de un término; por el otro, uno puede buscar lo emergente entre las relaciones. De acuerdo al primer punto de vista, algunos constituyentes o entidades (describibles en detalles) bajo ciertas condiciones aparecen de *novo* en las series; de acuerdo al segundo punto de vista, lo que aparece no es una entidad, sino un nuevo orden o arreglo de un material ya existente [...] Llamaré al primer punto de vista emergencia substancial, y al segundo emergencia estructural”. [Cunningham 1929, pp.149]

Cunningham piensa, teniendo en cuenta algunos problemas sobre la filosofía de la mente, que se ganaría en claridad si se discutiera bajo la formulación de una emergencia estructural. En este sentido, la característica o criterio distintivo de la teoría emergentista es la impredecibilidad, lo emergente es impredecible, pero inteligible.

Ablowitz (1939) presenta una síntesis de la teoría emergentista. Esta declara que el todo es más que la suma de sus partes, que hay niveles de existencia, y que hay una tendencia de unidades de cierto tipo en combinación para constituir unidades de un nuevo tipo, con una constitución más compleja, y nuevas cualidades debido a la nueva relación de las partes. A la nueva cualidad de existencia, afirma Ablowitz, resultante de la relación estructural de sus partes constituyentes, se ha aplicado el nombre de “emergente”. [Ablowitz 1939, pp.3]. Así, el proceso de evolución es esencialmente abrupto, más que gradual; nuevos tipos de relaciones estructurales emergen en un instante temporal específico. Otra apreciación importante hecha por Ablowitz fue la referente a que lo emergente no implica o supone el indeterminismo. Ablowitz lo manifiesta de este modo:

“¿Es la emergencia, por esta razón, indeterminista? Definitivamente no; el determinismo o indeterminismo es consistente con la aserción hecha. El mismo Morgan fue un determinista; él creyó que cada evento o emergencia tienen una causa; la novedad misma está atrapada en una red de nexos causales. Cada emergente puede ser científicamente interpretado y aprehendido, pero sólo después de que ha ocurrido. La novedad es impredecible, pero inteligible”. [Ablowitz 1939, pp. 5].

“La emergencia es compatible con una concepción determinista, y aun explica y permite la introducción en el universo de nuevos elementos, elementos que no podrían haber existido antes de su emergencia. La pregunta metafísica ¿qué tan abierto es el futuro? Puede, así, ser respondida: ampliamente abierto”. [Ablowitz 1939, pp.6].

El gran problema que él detecta en la teoría emergentista radica en el desacuerdo total con respecto al tema de los niveles emergentes: ¿cuántos son y cuáles son, qué es un nivel bajo y uno alto? Además, no se explicó, con la precisión requerida, cuál es la relación entre dichos niveles. Morgan dice que cada nivel no puede llegar a ser, a menos que involucre los niveles que le subyacen. Conger declara que los niveles posteriores se desarrollan a partir de los niveles antecesores por: 1) integración o síntesis creativa; 2) combinación de relaciones o por mutualidad de relaciones; y 3) emergencia de nuevas cualidades. En Alexander, cada uno de los seis niveles, después del primero (espacio-tiempo), es relacionado a su predecesor. Por último, Ablowitz, al igual que Cunningham, sostiene que la novedad esencial de la teoría emergentista radica en el énfasis puesto sobre la impredecibilidad.

Malisoff (1939) en su ensayo “Emergencia sin misterio” comienza haciendo un apunte crítico sobre el término emergencia, para él, ha sido interpretado en una multitud de formas, de las cuales la marca distintiva es el sentido de misterio o mistificación acerca de lo inesperado, lo imprevisto, o las nuevas formas de organización. Por ello, propuso una severa restricción al término “emergencia”. Emergencia, para Malisoff, debería utilizarse de la siguiente manera:

“El término debería ser utilizado para describir el mero hecho de que podemos dar descripciones alternativas de muchos sistemas dependiendo del grado de organización que deseamos atribuirle [...] Lo que se quiere decir es que, en la situación de considerar un sistema como organizado, nosotros tenemos algún control sobre la elección de puntos de vista o niveles de descripción. Así, nosotros podemos describir un ser humano en el nivel físico, el nivel biológico, y el nivel psicológico, como nosotros lo fijemos, aunque no con igual éxito”. [Malisoff 1939, pp.17]

Malisoff explica: “la restricción propuesta es mejor descrita como una elección para ordenar *niveles* de acuerdo al número de postulados requeridos para especificarlos” [Malisoff 1939, pp. 18]. Por niveles, él se refiere a la realidad física, biológica, o psicológica. Partiendo de esta distinción, Malisoff sugiere que la manera en la cual estos niveles pueden ser fijados es organizando las *ciencias* de acuerdo al número de postulados requeridos para definirlos, por ejemplo, si la biología trata con sistemas que son, a la vez, físicos, entonces, contiene todos los postulados de la física, más sus postulados propios y característicos. Lo mismo aplicaría para la psicología, la cual trata con sistemas que son, a

la vez, físicos y biológicos. Malisoff explica el cálculo del número de postulados para cada nivel así:

Imagine conjuntos de postulados matemáticos en orden de complejidad creciente, M_1 , M_2 , M_3 y así; imagine conjuntos similares de postulados puramente físicos, P_1 , P_2 , P_3 y así; y también un conjunto de postulados puramente biológicos, B_1 , B_2 , B_3 y así; y también un conjunto de postulados puramente psicológicos, C_1 , C_2 , C_3 y así. El número total de posibles formas de la física será aquel que consta de conjuntos de postulados, $M_1 + P_1$, $M_1 + P_2$, $M_1 + P_3$, etc., $M_2 + P_1$, $M_2 + P_2$, $M_2 + P_3$, etc., $M_3 + P_1$, $M_3 + P_2$, $M_3 + P_3$ etc., y así hasta el total de sumas que se puedan construir. Si el número total de conjuntos de postulados matemáticos es m , y el número total de conjuntos de postulados es p , el número total posible de formas de la física será pm [...] Si el número total de postulados biológicos está dado por b y c , respectivamente, el número total de psicologías³⁰ será $cbpm$. [Malisoff 1939, pp. 21-22].

De aquí se puede observar que, para describir un sistema psicológico, sería insuficiente hacerlo a partir, únicamente, de los postulados físicos o biológicos. Malisoff llama a esta posición la estructura lógica de la emergencia, su ventaja, él sostiene, es que “mantiene la esperanza de un tratamiento cuantitativo” [Malisoff 1939, pp. 19]. Para Malisoff, la emergencia es “relativa en el sentido típico de depender del modo de observación, por ejemplo, relativa a especificaciones y presuposiciones o postulados” [Malisoff 1939, pp. 23]. Con ello su punto de vista se ajusta más al de un emergentismo epistemológico.

Henle (1942) asume que “hay emergencia donde una nueva forma aparece y donde las causas de la aparición son incapaces de explicar la forma” [Henle 1942, pp.488]. Pero Henle propone que la novedad a la que hay que referirse es a una novedad lógica, con lo cual la inclinación de Henle es, claramente, hacia un emergentismo epistemológico. Su postura se resume así:

“La novedad claramente existe en el universo y puede, de hecho, caracterizar cada evento, pero esto no implica una doctrina de la emergencia. La predecibilidad no es un predicado simple y no puede ser usado como un criterio para la emergencia excepto sobre la base de alguna hipótesis, presumiblemente la hipótesis más simple, la cual es capaz de explicar características previas. A la emergencia se le puede dar un estatus metafísico sólo si un estatus similar se le puede dar a la simplicidad lógica. Las indicaciones son de que este no es el caso, pero, de cualquier modo, el foco de discusión sobre la emergencia debe ser el concepto de la simplicidad lógica”. [Henle 1942, pp. 493].

³⁰ Por “posibles psicologías”, Malisoff se refiere a todo lo que puede acontecer en el nivel psicológico, o al espacio de posibilidades que se encuentra en ese nivel, el cual está determinado por sus propios postulados, y por los de sus niveles predecesores.

Pap (1952) y Berenda (1953) encuentran en la impredecibilidad, también, el mayor aporte de la teoría emergentista. Pap lo describe así:

“Decir que una cualidad Q (o relación R) es absolutamente emergente es decir que la ley que correlaciona Q (o R) con las condiciones físicas cuantitativas es *a priori* impredecible, de aquí sigue que la emergencia absoluta es relativa a un sistema de reglas semánticas”. [Pap 1952, pp.310].

Con esto, una primera etapa del emergentismo ha sido planteada. A partir de ella pueden recapitularse algunos puntos sobresalientes. En primer lugar, el que se hayan desarrollado una diversidad de términos, tales como evolución emergente, vitalismo emergente, emergencia absoluta, emergencia substancial, emergencia estructural, etc., para describir un fenómeno similar, lejos de aclarar, confunde la intuición general que se tiene del problema, pero, en todo caso, esta no es una complicación que atañe sólo a la noción de emergencia. Un problema mayor, que en esta etapa no encontró acuerdo, fue el de la unidad de la emergencia, en otras palabras, cuál es la respuesta esperada al plantearse la pregunta ¿qué es aquello que emerge? Algunas respuestas fueron: leyes; características; cualidades; o lo emergente, sin más. Esta posición –no siendo el único ni el mayor problema- dificultó el avance en la explicación sobre la relación entre niveles.

Por otra parte, el fisicalismo, por un lado, y la continuidad causal, por el otro, fueron argumentos comunes, al menos, en el emergentismo inglés representado por Alexander, Morgan, y Broad, lo cual muestra que no estaban, en principio, en desacuerdo con una concepción determinista del universo. El emergentismo inglés enfatizó tres marcas o distintivos que caracterizan a la emergencia: la novedad, la impredecibilidad y la irreducibilidad. En los años posteriores a la publicación de las obras de los principales emergentistas ingleses, el elemento que tomo mayor fuerza como marca del emergentismo fue la impredecibilidad, por encima de los criterios de novedad e irreducibilidad. En cierto sentido, el emergentismo inglés, después de su efecto desvitalizar, se fue desvaneciendo, y su postura más fuerte, ontológica, acerca de la aparición de novedades en el universo irreducibles a un nivel inferior, se fue transformando en la tesis que afirmaba la imposibilidad de poder predecir el surgimiento de nuevas propiedades a partir del conocimiento exhaustivo de sus elementos constituyentes, esto es, la emergencia fue tomando un carácter más epistemológico. McLaughlin (1992) habla de una caída del

emergentismo inglés y la atribuye, más que a motivos filosóficos, a motivos empíricos. Así lo describe:

“En su indagación por descubrir “la conexión o falta de conexión de las diversas ciencias” (Broad 1923 pp. 41-42) los emergentistas dejaron la tierra firme de lo *a priori* y se aventuraron al mar de la fortuna empírica. (La única ruta es por el mar, claro). Ellos se mantuvieron en cierta dirección, y por un tiempo los vientos de la evidencia estuvieron en su velero; pero el viento gradualmente disminuyó, y eventualmente cesó de soplar en su camino” [McLaughlin 1992].

3.1.6 El neo-emergentismo

A partir de la década de los años cincuenta, el emergentismo se mantuvo alejado del debate científico y filosófico, al menos, hasta la década de los años setenta (Kim 1999, pp. 5). A partir de entonces, un resurgimiento de la doctrina emergentista ha tenido lugar, ya con mayor fuerza, en la década de los noventa, en campos tan diversos como lo son la biología evolutiva, la vida artificial, la neurofisiología, la filosofía de la mente, las ciencias cognitivas, la termodinámica de procesos alejados del equilibrio, la economía y las ciencias sociales, mezclado esto con el advenimiento de las teorías de la complejidad y el caos, los sistemas adaptativos complejos, la complejidad computacional y el conexionismo. Nuevos personajes han poblado el terreno de la discusión emergentista, entre ellos, por citar algunos: Kauffman (1993, 1995, 2000); Holland (1996, 1998); Crutchfield (1994); Sperry (1986, 1991); Kim (1984, 1985, 1987, 1999); Searl (1992), Stephan (1999, 2002); Wimsatt (1972, 1974, 1995, 1997, 2002); Humprey (1997a, 1997b); O'Connor (1994, 2002); Emmeche (1997a, 1997b, 1997c, 2000), Baas (1997), Bickhard (2000, 2004), McLaughlin (1992, 1997).

El neo-emergentismo –término que puede ser empleado para describir este resurgimiento– con el propósito de ganar en claridad, ha sido sujeto de diversas clasificaciones y definiciones, pero al igual que el emergentismo de primera generación, lejos de despejar el terreno, lo han vuelto más sinuoso. El objetivo inmediato será mostrar algunas de las posturas con las cuales se ha encarado el problema del emergentismo a partir de su resurgimiento hacia el final del siglo XX, y, finalmente, plantear una clasificación que nos

ayude a tener una clara lectura de la teoría emergentista de cara al análisis de proyecto Kauffmaniano.

3.1.6.1 Emergentismo y micro-determinismo

Robert Klee (1984) en su importante ensayo “Micro-Determinismo y Conceptos de Emergencia” sugiere, en primer lugar, la utilización del término “propiedades” para referirse a las unidades de emergencia, pues, para él, parece ser intuitivamente más entendible y no tan problemático en su aplicación como la noción de ley³¹ [Klee 1984, pp. 48]. Hecha tal precisión, su objetivo es mostrar que tres de los cuatro distintos criterios utilizados para distinguir lo que hace a una propiedad ser emergente, son compatibles con una explicación micro-determinista, mientras el restante (macro-determinista), no. Los cuatro criterios son planteados así:

“La propiedad *P* es emergente en un nivel de organización en un sistema, con respecto a la micro estructura (*MS*) de menor nivel de ese sistema, cuando se encuentren cualquiera de las siguientes condiciones:

(1) *P* es impredecible, en principio, a partir de *MS* (por ejemplo, impredecible aun desde un completo conocimiento teórico de *MS* en el límite de la indagación científica).

(2) *P* es nueva con respecto a *MS*.

(3) *MS* exhibe un mayor grado de variación y fluctuaciones que aquellos del nivel de organización donde *P* ocurre, la constante y perdurable presencia en el sistema no parecería completamente determinada por *MS*.

(4) *P* tiene una directa y determinante influencia sobre, al menos, alguna de las propiedades en *MS*”. [Klee 1984, pp. 48].

Klee sustenta la compatibilidad del criterio de impredecibilidad con una postura micro-determinista acerca de las propiedades emergentes, porque, a saber, la impredecibilidad no implica la no existencia de una influencia causal entre la micro-estructura y las macro-propiedades. El criterio de novedad es igualmente compatible, pues en un sistema, si una propiedad *P* es nueva con respecto a la micro-estructura de menor nivel, de ahí no sigue

³¹ Pepper [1926, pp. 242] ya había hecho una crítica al respecto, él sostenía: “Hablando con precisión, debemos observar, las leyes no pueden emerger. Emergencia se supone que es un evento cósmico y las leyes son descripciones. Lo que emerge no son leyes, sino lo que las leyes describen”. Cf. Pepper, S.: “Emergence”, *The Journal of philosophy*, 23, 1926, pp. 241-245

que P no fue determinada por MS . El tercer criterio, denominado por Klee de constancia y orden invariable, expresa, a grandes rasgos, la aparente independencia entre las macro-propiedades de un sistema con respecto a las variaciones y cambios constantes existentes en la micro-estructura. Pero Klee también afirma, sobre esta característica, su posible asimilación a una postura micro-determinista. Si se supone que los mismos efectos en un sistema son producidos siempre por las mismas causas, no habría manera de que los cambios en la micro-estructura no afectaran la estabilidad de las macro-propiedades. Pero para Klee, esta suposición es insostenible, pues un mismo efecto puede ser producido por una diversidad de causas, y a la vez, esto no impide que las macro-propiedades sean determinadas por la micro-estructura. Klee reconoce que la noción de micro-determinismo –como modelo general de determinación- propuesto por Jaegwon Kim (1978), ayuda a esclarecer la relación causal entre micro-estructuras y macro-propiedades. [Klee 1984, pp. 49-56]

Por último, Klee encuentra en el cuarto criterio, a saber, el del macro-determinismo, el más complicado de ajustar a una postura micro-determinista. Su análisis se basa sobre los trabajos del biólogo D.T. Campbell (1974) y el neurofisiólogo R.W. Sperry (1969). El macro-determinismo implica una causalidad descendente (*downward causation*), esto es, las propiedades P tienen efectos causales sobre las propiedades de menor nivel, en el sentido de influir en los efectos de la micro-estructura dentro de una, por ejemplo, población biológica; en otros términos, la conciencia es una propiedad de mayor nivel que influye en los procesos neuronales subyacentes. Esta influencia en sentido descendente es lo que hace a las propiedades de mayor nivel ser emergentes con respecto a lo que ellas influyen [Klee 1984, pp. 58]. Klee, aunque no descarta contundentemente la validez de una posición macro-determinista en la explicación de las propiedades emergentes, como la expuesta anteriormente, afirma que ésta bien puede ser entendida como una relación inter-sistémica la cual, en la mayoría de los casos, tomando el marco de referencia adecuado, es explicada por los micro-mecanismos subyacentes. [Klee 1984, pp. 62].

Wimsatt (1997, 2002) sugiere la posibilidad de una explicación reductiva acerca de las propiedades emergentes. Tal afirmación, él es consciente, parece ser una contradicción, pues muchos emergentistas sostendrían que una propiedad emergente es irreducible a sus

partes constituyentes, y muchos reduccionistas mantendrían que una explicación reductiva demuestra, en última instancia, la disolución de todo fenómeno emergente. Para comenzar, Wimsatt define lo que es una propiedad emergente de la manera siguiente:

“Una propiedad emergente es, en términos generales, la propiedad de un sistema la cual depende del modo de organización de las partes del sistema. Esto es compatible con el reduccionismo, y también común”. [Wimsatt 1997, pp. S373].

Si las propiedades emergentes del sistema dependen del arreglo de las partes, como lo expresa la definición, esto indica –apunta Wimsatt– “una sensibilidad-contextual de las propiedades de las partes relacionadas con las condiciones intra-sistémicas” [Wimsatt 1997, pp. S374]. También puntualiza que algunos emergentistas suponen una sensibilidad-contextual extra-sistémica de las propiedades del sistema. Ambas –resuelve– pueden ser reduccionistas. El segundo caso es similar al expuesto por Klee (1984) en relación al criterio macro-determinista, y la posible solución, similar. La salida que Wimsatt propone para ello, entraña la redefinición de los límites de los sistemas en cuestión, ello, con la finalidad de incluir las propiedades externas. Un sistema más incluyente produciría una explicación reduccionista más adecuada. Wimsatt no supone que una explicación reductiva de las propiedades emergentes elimine la noción de emergencia; por el contrario, la refuerza. Su estrategia para probarlo se basa sobre la identificación de aquello que no es emergente, esto es, en identificar los casos de agregatividad³², casos en que lo resultante es un mero agregado de las propiedades de sus partes; en este sentido, Wimsatt concibe las propiedades emergentes como fallas de agregatividad. La estrategia a seguir la justifica así:

“La emergencia involucra algún tipo de interdependencia organizacional de diversas partes, pero hay muchas formas posibles de tal interacción, y no hay una forma clara de clasificarlas. Es más fácil discutir fallas de emergencia (Wimsatt 1986), describiendo las condiciones que deberían ser encontradas para que las propiedades del sistema no sean emergentes –para que sean un “mero agregado” de las propiedades de sus partes”. [Wimsatt 1997, pp. S375].

En pocas palabras, las propiedades que no cumplan las condiciones de agregatividad serán clasificadas como emergentes.

³² El uso del término agregatividad hecho por Wimsatt es equivalente a lo descrito por G.H. Lewis (1875) y Loyd Morgan (1923) como resultante. Ambos, agregatividad y resultante, se refieren a que la propiedad de un sistema puede ser explicada por la mera adición de las micro-propiedades que la constituyen.

Estas condiciones tienen que ver con la forma en la cual el sistema es afectado por: (1) la inter-sustitución o re-arreglo de partes; (2) la adición o sustracción de partes; (3) la descomposición y re-agregación de partes; y (4) una condición de linealidad: la interacción cooperativa o inhibitoria entre las partes en la producción o realización de la propiedad del sistema. Siguiendo a Wimsatt:

“Para que la propiedad de un sistema sea un agregado con respecto a la descomposición del sistema en partes y sus propiedades, las siguientes condiciones deben cumplirse:

Suponga $P(S_i) = F\{[p_1, p_2, \dots, p_n(s_1)], [p_1, p_2, \dots, p_n(s_2)], \dots, [p_1, p_2, \dots, p_n(s_m),]\}$ es una función de composición para la propiedad del sistema $P(S_i)$ en términos de las propiedades de las partes p_1, p_2, \dots, p_n , de las partes s_1, s_2, \dots, s_m . La función de composición es una ecuación –una identidad sintética entre niveles.

1. **IS (Inter-sustitución)**. La invariabilidad de la propiedad del sistema bajo la operación del re-arreglo de partes en el sistema, o el intercambio de cualquier número de partes con el correspondiente número de partes, a partir de una clase de partes equivalentes relevantes. (Esto debería parecer ser satisfecho si la función de composición es *conmutativa*).
2. **QS (Tamaño de la escala)**. **Similitud Cualitativa** de la propiedad del sistema (identidad, o si esta es una propiedad cuantitativa, diferenciación en términos de valor) bajo la adición o sustracción de partes. (Esto sugiere la definición inductiva de una clase de funciones de composición).
3. **RA (Descomposición y Re-Agregación)**. La invariabilidad de la propiedad de un sistema bajo operaciones que involucran la descomposición y re-agregación de partes. (Esto sugiere una función de composición *asociativa*).
4. **CI (Linealidad)** No hay interacción cooperativa o inhibitoria entre las partes del sistema para esta propiedad.

Las condiciones **IS** y **RA** son implícitamente relativas a la descomposición de las partes dadas, como lo son (menos obvio) **QS** y **CI**. *Para que la propiedad de un sistema sea verdaderamente agregativa, debe cumplir estas condiciones para todas las posibles descomposiciones del sistema en sus partes. Esta es una condición extremadamente fuerte, y raramente encontrada”. [Wimsatt 1997, pp. S376].*

Dados estos criterios y esta heurística reductiva –como la llama Wimsatt- resulta sorprendente conocer que son muy pocas las propiedades que logran satisfacer las cuatro condiciones, lo cual hace de la emergencia la regla y no la excepción [Wimsatt 1997, pp.

S382]. Casos paradigmáticos de propiedades agregativas los encuentra en las leyes de conservación de la física: masa, energía, momentum, y carga neta; pero no más.

Si una propiedad es agregativa o no, o emergente o no, puede parecer una cuestión ontológica, pero el mismo Wimsatt señala preferir cambiar este enfoque por uno más productivo y de utilidad heurística [Wimsatt 1997, pp.S382]. En ese sentido, para él, su noción de emergencia y agregatividad prueba ser de utilidad para clasificar y entender los fenómenos de organización, además, ayuda en el esclarecimiento de la contradicción supuestamente existente entre reduccionismo y emergencia.

Mark Bedau (1997) sugiere que el principal objetivo en una defensa de la noción de emergencia es mostrar que las propiedades emergentes son útiles para las ciencias empíricas, y no sólo curiosidades filosóficas. Argumenta a favor de una “emergencia débil” que es metafísicamente inocente, consistente con el materialismo, y científicamente útil, especialmente en las ciencias de la complejidad que tratan con los problemas de la vida y la mente [Bedau 1997, pp. 377]. La emergencia débil aplica –afirma Bedau- en contextos en los cuales existe un sistema S , compuesto a partir de las partes de un micro-nivel; el número e identidad de tales partes podría cambiar con el tiempo. S tiene varios macro-estados, y varios micro-estados. Los micro-estados de S son el estado intrínseco de sus partes, y sus macro-estados son propiedades estructurales constituidas completamente por sus micro-estados. Los macro-estados típicamente promedian sobre los micro-estados y así comprimen la información del micro-estado. Además, hay una micro-dinámica D , la cual gobierna el tiempo de evolución de los micro-estados de S . Usualmente los micro-estados de una parte dada del sistema, en un momento dado, son el resultado del micro-estado de las partes cercanas al sistema en un tiempo precedente; en este sentido, D es local. De estas suposiciones, Bedau, define la noción de “emergencia débil” de la siguiente manera:

“El macro-estado P de S con una micro-dinámica D es débilmente emergente si P puede ser derivado a partir de D y las condiciones externas de S , pero sólo por simulación”. [Bedau 1997, pp. 378].

“Condiciones externas” son las condiciones afectantes ubicadas fuera del sistema S . Si la dinámica D es determinista y el sistema S es cerrado, la única condición externa son las

condiciones iniciales del sistema S . Si el sistema es abierto, otros tipos de condiciones externas son las contingencias o el flujo de partes y estados a través de S .

Dadas las condiciones iniciales y la secuencia de todas las otras condiciones externas, la micro-dinámica del sistema determina completamente cada micro-estado sucesivo del sistema. Para simular el sistema uno itera su micro-dinámica, proporcionando una corriente contingente de condiciones externas como entradas. En tanto que el macro-estado P es una propiedad macro-estructural constituida a partir de los micro-estados del sistema, las condiciones externas y la micro-dinámica determinan completamente si P ha de materializarse en cualquier estado de la simulación. Simulando el sistema de esta forma, uno puede derivar, desde la micro-dinámica y las condiciones externas, la propiedad P en cualquier momento dado después de la condición inicial. Lo que distingue a un macro-estado débilmente emergente es que esta clase de simulación es requerida para derivar el comportamiento del macro-estado a partir de la micro-dinámica del sistema.

La necesidad de utilizar simulaciones –explica Bedau- “no se debe al corriente estado contingente de nuestro conocimiento ni a determinada limitación humana o defecto” [Bedau 1997, pp. 379]. Se debe a que sin simulación únicamente se tendría la noción puramente formal de la existencia o no existencia de ciertos tipos de derivación o macro-estados a partir de la dinámica subyacente del sistema. Para Bedau, la importancia de la noción de emergencia –para él “emergencia débil”- radica en su utilidad para el avance de las ciencias empíricas [Bedau 1997, pp. 376]. En ese sentido, Bedau retoma el móvil inicial del emergentismo inglés, y como lo expresa McLaughlin (1992), si el emergentismo inglés cayó más que por motivos filosóficos, por motivos empíricos, Bedau estaría de acuerdo en afirmar que el resurgimiento del emergentismo se debe a motivos empíricos más que a motivos filosóficos.

3.1.6.2 Emergencia y macro-determinismo

El neurofisiólogo y premio Nobel R. W. Sperry ha sostenido por décadas (1969, 1986, 1991) un emergentismo macro-determinista o interaccionismo emergente basado sobre la

noción de causalidad descendente. La causalidad descendente fuerte supone que una entidad o proceso en un nivel dado puede, causalmente, infligir cambios o efectos en entidades o procesos de un nivel menor [Emmeche *et al.* 2000, pp. 18]. La noción de causalidad descendente defendida por Sperry es más modesta; ésta puede ser enunciada así:

“Una entidad en un nivel mayor llega a ser tal a través de la comprensión –en el sentido de abarcar o contener- de un estado entre otros posibles –con el estado previo del nivel mayor como factor de selección. En otras palabras, las entidades de mayor nivel son condiciones limitantes para la actividad emergente de los niveles menores”. [Emmeche *et al.* 2000, pp. 24-25].

Sperry lo ejemplifica tomando una rueda cuesta abajo. Ninguna de las moléculas que constituyen la rueda, o el tirón gravitatorio ejercido sobre ellas, son suficiente para explicar el movimiento de la rueda. Para explicarlo, uno debe recurrir al nivel mayor en el cual la forma de la rueda llega a ser concebible. Sperry no niega el papel que juegan las interacciones de los micro-constituyentes, lo que afirma es que estas interrelaciones llegan a integrarse en, envolverse, y como resultado, son trasladadas y llevadas por la propiedad dinámica del sistema entero (mayor) como un todo, en este caso: la rueda que tiene su propia e irreducible forma de mayor nivel de interacción causal [Sperry 1991, pp. 230]. Sperry sostiene que el nivel mayor desempeña una función irreducible al nivel menor.

Timothy O'Connor (1994, 2002, 2004) se ha expresado de dos distintas maneras con respecto al problema de la emergencia de propiedades. En una primera aproximación su concepción descansa en tres características: micro-determinación³³, no-estructuralidad, y

³³ El término originalmente empleado en el idioma inglés por O'Connor, y por muchos otros autores contemporáneos (Davidson, Kim, Kleen, McLaughlin, Sthepan, etc.) es “supervenience”. Esta palabra es utilizada para describir la relación o determinación causal entre propiedades, esto es, un conjunto de propiedades o hechos *M* sobreviene de un conjunto de propiedades o hechos *P* si y sólo si no hay cambios o diferencias en *M* sin que haya cambios y diferencias en *P*. (Dictionary of Philosophy of Mind, 2004). Jaegwon Kim (1987) distingue tres clases distintas: débil, fuerte, y global.

La débil la define así: “*A* sobreviene débilmente de *B* sólo en el caso de: necesariamente, para cualquier *x* e *y*, si *x* e *y* comparten todas las propiedades en *B*, entonces *x* e *y* comparten todas las propiedades en *A* –esto es, indiscernibilidad en *B* supone indiscernibilidad en *A*”. [Kim 1987, pp. 315]

La fuerte, de la manera siguiente: “*A* sobreviene fuertemente de *B* sólo en el caso de: necesariamente, para cualquier objeto *x* y cualquier propiedad *F* en *A*, si *x* tiene *F*, entonces existe una propiedad *G* en *B* tal que *x* tiene *G* y necesariamente si cualquier *y* tiene *G*, este tiene *F*”. [Kim 1987, pp. 316]

La global, de esta forma: “*A* sobreviene de *B* cuando el grado en el cual dos mundos cualesquiera son similares con respecto a las propiedades de *B* es emparejado con el grado en el cual ellos son similares respecto a las propiedades de *A*. [Kim 1987, pp. 325]

nueva influencia causal. O'Connor critica que otros autores han tratado de explicar la emergencia de propiedades a partir solamente de una de las características antes citadas. La micro-determinación es necesaria si la emergencia quiere ser incorporada dentro de un marco de explicación científica. La no-estructuralidad se refiere a que las propiedades sean: potencial y exclusivamente poseídas por objetos de cierta complejidad, no poseídas por ninguna de las partes del objeto, distintas de cualquier propiedad estructural del objeto. La idea de una nueva influencia implica que una influencia causal emergente es irreducible a aquellas de las micro-propiedades de las cuales sobreviene: ésta lleva su influencia de un modo directo, descendente [O'Connor 1994, pp. 103-105]. O'Connor propone la siguiente definición:

“Una propiedad P es una propiedad emergente de un objeto Q si:

- (1) P sobreviene (es micro-determinado) a partir de las partes de Q; y
- (2) P no es poseída por cualquiera de las partes del objeto; y
- (3) P es distinto de cualquier propiedad estructural de Q, y
- (4) P tiene una influencia determinativamente directa (“descendente”³⁴) sobre el patrón de comportamiento que involucra las partes de Q. [O'Connor 1994, pp. 105]

Para una revisión general del tema consultar: Kim, J.: “Concepts of supervenience”, *Philosophy and Phenomenological Research*, 45-2,1984, pp. 153-176; Kim, J.: “Strong and Global Supervenience”, *Philosophy and Phenomenological Research*, 48-2, 1987, pp. 315-326; McLaughlin, B.: “Supervenience, Vagueness, and Determination”, *Philosophical Perspectives*, 11, *Mind, Causation, and World*, 31, 1997, pp. 209-230.

³⁴ Timothy O'Connor, al igual que Sperry y otros autores, utiliza el concepto “downward causation”, el cual puede ser traducido como “causalidad descendente”. El término lo utilizó Donald T. Campbell (1974) por vez primera para explicar que cualquier consecuencia de la causalidad emergente afectará los niveles menores, niveles constituyentes de patrones y organización, así como también el nivel en el cual la emergencia ocurre [Bickhard 2000]. Emmech *et al.* (2000) distingue tres tipos de causalidad descendente: fuerte, media y débil. Kim (1999), dos: reflexiva sincrónica y reflexiva diacrónica.

La causalidad descendente fuerte se describe así: Una entidad o proceso en un nivel dado puede, causalmente, infligir cambios o efectos en entidades o procesos de un nivel menor. [Emmech *et al.* 2000, pp.18].

La causalidad descendente media se explica así: Una entidad en un nivel mayor llega a ser tal a través de la comprensión –en el sentido de abarcar o contener– de un estado entre otros posibles –con el estado previo del nivel mayor como factor de selección. [Emmech *et al.* 2000, pp. 24-25].

La causalidad descendente débil no puede ser interpretada como cualquier tipo de causalidad eficiente. La causalidad descendente debe ser interpretada como un caso de causalidad formal, un principio de organización. [Emmech *et al.* 2000, pp. 31].

La causalidad descendente reflexiva sincrónica: Este caso involucra la controvertida idea de la causalidad simultánea, donde una causa y su efecto ocurren al mismo tiempo. En un cierto tiempo t, un todo, W, tiene la propiedad emergente M a partir de la siguiente configuración de condiciones: W tiene una descomposición completa en partes a₁,..., a_n; cada a_i tiene la propiedad P_i; y la relación R se mantiene para la secuencia a₁,..., a_n. Para algún a_i, W teniendo M en t causa que a_i tenga P_i en t. [Kim 1999, pp. 24]

El macro-determinismo emergente expuesto por O'Connor, en su primera aproximación, tiene un fuerte compromiso ontológico, pero es confuso, pues supone, a la vez, un micro-determinismo y un macro-determinismo difícil de ajustar en un mismo esquema explicativo. Su segunda aproximación (2000, 2002, 2004), llamada “emergencia dinámica”, se aparta de su postura inicial en la cual aceptaba la necesidad de un micro-determinismo para dar cuenta de la emergencia de propiedades. En su segunda aproximación supone la existencia de propiedades emergentes más fundamentales que determinan las propiedades que serán mostradas en cierto tiempo. Como algunos de estos factores antecedentes pueden ser indeterminísticos, podría haber dos posibilidades nomológicas expresando la misma propiedad física en un tiempo t mientras muestran diferentes propiedades emergentes [O'Connor 2002]. En este sentido, el giro dado por O'Connor es radical, pues supone un indeterminismo en la base de la explicación emergentista.

Paul Humphreys (1997a, 1997b) desarrolla una noción distinta sobre la emergencia de propiedades que, al igual que el segundo O'Connor, prescinde del micro-determinismo (*supervenience*) como mecanismo causal. Su propuesta –sugiere O'Connor (2000)- es una relación metafísica llamada “fusión”. En ella, las propiedades emergentes resultan de una interacción esencial (fusión) entre sus propiedades constituyentes, una interacción que es nomológicamente necesaria para la existencia de las propiedades emergentes. Las entidades fusionadas pierden parte de sus poderes causales y dejan de existir como entidades separadas, y lo emergente generado por fusión es caracterizado por nuevos poderes causales. Humphreys enfatiza que la fusión es una operación física real [Humphrey 1997a, pp.10], un proceso dinámico diacrónico, no una operación lógica o matemática sobre las representaciones predicativas de las propiedades. La principal

La causalidad descendente reflexiva diacrónica: Como en la anterior, \underline{W} tiene una propiedad emergente \underline{M} en \underline{t} , y \underline{a}_i tiene \underline{P}_i en \underline{t} . Ahora se considera el efecto causal de \underline{W} teniendo \underline{M} en \underline{t} sobre \underline{a}_i en un momento posterior $\underline{t}+\Delta\underline{t}$. Suponer, entonces, que \underline{W} teniendo \underline{M} en \underline{t} causa que \underline{a}_i tenga \underline{Q} en $\underline{t}+\Delta\underline{t}$. [Kim 1999, pp. 26].

Una discusión más profunda sobre estos tipos de causalidad descendente se pueden consultar en: Kim, J.: “Making Sense of Emergence”, *Philosophical Studies*, 95, 1999, pp. 3-36; Emmech, C. et al: “Levels, Emergence, and Three Versions of Downward Causation”, en Andersen, P. B., Emmeche, C., Finnemann, N. O., y Christiansen, P. V., (eds), *Downward Causation. Minds, Bodies and Matter*, Århus: Aarhus University Press, 2000, pp. 13-34; y Stephan, A.: “Emergentism, Irreducibility, and Downward Causation”, *Grazer Philosophische Studien*, 65, 2002, pp. 77-93.

característica de un evento fusionado es que éste es un “todo” unificado, en el sentido de que sus efectos causales no son correctamente representados en términos de sus efectos causales separados o sus constituyentes. La postura asumida por Humphrey toma como principal elemento característico de las propiedades emergentes, al igual que Morgan, la novedad [Humphreys 1997b, pp. 341]. De ahí su concepción ontológica acerca de las propiedades emergentes.

Mark Bickhard (2000, 2004) defiende la existencia de la emergencia desde una perspectiva ontológica, pero ello, él afirma, es sólo válido haciendo un cambio en el marco metafísico de explicación, a saber, el cambio de una metafísica de sustancias y partículas por una metafísica de procesos. La consecuencia es que la emergencia se convierte en un hecho trivial. Así lo expresa:

“Argumentaré que la emergencia genuina existe, y que las dificultades encontradas al tratar de entenderla han sido exacerbadas por la presuposición de una falsa metafísica –una metafísica de sustancias (partículas) y propiedades. Hay buenas razones para abandonar tal marco metafísico, y para sustituirlo por una metafísica de procesos. En este marco alternativo de una metafísica de procesos la posibilidad de la emergencia, incluyendo la genuina emergencia eficazmente causal, es encontrada trivial –el, en principio, misterio de la emergencia es disuelto”. [Bickhard 2000]

El principal argumento que refuta es la feroz crítica hecha por Kim sobre el emergentismo, la cual resume de la siguiente manera:

No pueden emerger nuevas sustancias. Sólo las combinaciones u organizaciones son posibles. Aún más, si todo es sustancia, o, en su forma atomista contemporánea, si todo es partículas, entonces todos los poderes causales residen en la sustancia básica o al nivel de las partículas. En particular, no hay poder causal emergente. En efecto, su argumento posee un dilema: el naturalismo es falso, o la genuina emergencia no existe. Si los fenómenos de mayor nivel no derivan de los de menor nivel, entonces tenemos una clase de dualismo y el naturalismo es falso o, si los fenómenos de mayor nivel derivan de los de menor nivel, entonces toda causalidad reside en las partículas fundamentales del nivel menor. [Bickhard 2004, pp. 3-4].

Bickhard afirma que tales partículas no son todo lo que hay. Hay, también, campos, y, en particular, campos cuánticos. La teoría de los campos cuánticos produce un cuadro muy distinto al de la mecánica de micro-partículas. La teoría de los campos cuánticos produce un continuo de actividad interminable de procesos, aun en el vacío. La ontología no es

atomizada en partículas sobre un estado del tiempo y el espacio, y la causa no es atomizada en los puntos de encuentro entre partículas [Bickhard 2000]. De hecho, no hay partículas para Bickhard. En la teoría de campos cuánticos todo es organización de procesos cuánticos, la causalidad es una restricción sobre ese campo cuántico de actividad. Desde este punto de vista –todo es procesos de organización- no hay un último nivel de partículas reales sobre las cuales todo lo demás sobreviene, y con respecto al cual todo lo demás es un epifenómeno. En este sentido, el último nivel de micro-partículas/micro-causalidad, no existe.

Bickhard concluye que, si todo lo que hay son patrones de procesos subyacentes, las macro-organizaciones de tales procesos son, también, válidas y tan físicamente reales como lo son las micro-organizaciones de tales procesos. Más aún, en tanto que las relaciones internas y externas de los procesos son todo lo que existe, entonces los procesos de organización son un candidato válido para ser constitutivos de la emergencia. Esto es, los niveles mayores lo son de procesos de organización relativos a procesos de organización de niveles menores, y las propiedades que derivan de tales niveles mayores son candidatos válidos para ser emergentes [Bickhard 2000]. Por otro lado, él reconoce: “[...] cada tipo particular de emergencia requerirá su propio modelo” [Bickhard 2000]. De aquí, la suya se puede interpretar como una teoría general de la emergencia. Finalmente, Bickhard toma como criterio crucial de emergencia en su teoría la causalidad: “la emergencia que no es trivial es la causalidad emergente –la emergencia de nuevas propiedades causales” [Bickhard 2000].

3.1.6.3 El emergentismo y su clasificación

Como se ha podido apreciar, la noción de emergencia ha sido encarada desde una pluralidad de enfoques, en algunos de ellos es perfectamente compatible con una postura micro-determinista y reductiva, en otras, macro-determinista e irreducible, en otras más, indeterminista e irreducible; algunas muestran un compromiso meramente epistemológico, mientras otras un fuerte componente ontológico. El hacer una valoración de las distintas alternativas emergentistas no es el objetivo presente del trabajo, pero si el plantear una

posible clasificación, la cual permita ubicar el proyecto Kauffmaniano dentro del contexto emergentista. Para ello serán de gran valor los trabajos desarrollados por Stephan (1999, 2002), Cunningham (2001), y Silberstein y McGeever (1999).

Silberstein y McGeever (1999), al igual que Cunningham³⁵ (2001), hacen una distinción general entre emergentismo ontológico y emergentismo epistemológico. El emergentismo ontológico hace referencia a los elementos de un sistema que poseen capacidades causales no reducibles a cualquiera de las capacidades causales intrínsecas de las partes, o a cualquiera de las relaciones entre las partes. Desde esta perspectiva, las propiedades emergentes son las propiedades de un sistema tomado como un todo, el cual ejerce una influencia causal sobre las partes que lo constituyen, pero distinto de las capacidades causales de las partes mismas. La emergencia ontológica supone la falla del reduccionismo (parte-todo), así como también la falla del micro-determinismo. [Silberstein y McGeever 1999, pp. 182]. El emergentismo ontológico supone dos características fundamentales: causalidad y novedad, esto es, supone la emergencia de nuevas propiedades.

El emergentismo epistemológico es producto, meramente, de un modelo particular formal generado por el análisis macroscópico o por algún otro tipo de descripción de mayor nivel de casos que potencialmente involucran la emergencia ontológica [Silberstein y McGeever 1999, pp. 182]. Muchos ejemplos de emergencia, ya sea en campos como el de la vida artificial, la biología evolutiva, el conexionismo, etc., son de tipo epistemológico. Silberstein y McGeever refieren estos casos como aquellos en los cuales es inútil tratar de entender el comportamiento del sistema entero trazando cada parte individual del proceso. El supuesto de los emergentistas epistemológicos sería: “debemos encontrar un método para representar lo que el sistema hace sobre el todo o sobre el promedio de una manera en

³⁵ Bryon Cunningham (2001) realiza una clasificación similar a la de Silberstein y McGeever, esto es, una separación entre emergentismo ontológico y emergentismo epistemológico. La distinción entre ambas propuestas radica en el planteamiento hecho por Cunningham acerca de dos clases de propiedades emergentes que suponen dos tipos de emergentismo epistemológico, éstas son: (1) propiedades completamente configuracionales como lo son las propiedades mentales tal y como son concebidas por los funcionalistas y computacionalistas; y (2) propiedades altamente holístico/configuracionales, tales como los patrones característicos de los sistemas dinámicos complejos. El problema con la aproximación de Cunningham radica en que cada tipo distinto de propiedad supondría un tipo distinto de emergentismo epistemológico, en ese sentido, la postura asumida por Silberstein y McGeever es más general y, a la vez, más clara. Para revisar la clasificación y los argumentos expuestos por Cunningham consultar: Cunningham, B.: “The Reemergence of Emergence”, *Philosophy of Science*, 68, 2001, pp. S62-S75

la cual se pueda prescindir de los detalles causales” [Silberstein y McGeever 1999, pp. 185]. Silberstein y McGeever continúan:

“Esto regularmente involucra el agrupamiento de sistemas con diferentes sustratos subyacentes causales, a fin de estudiar su comportamiento cualitativo (como en el caso de la teoría de los sistemas dinámicos). Este tipo de explicaciones implican, regularmente, descripciones de un nivel mayor de alguna clase u otra: ejemplos que implican promedios, las leyes de los gases, la mecánica estadística en general”. [Silberstein y McGeever 1999, pp. 185-186]

Por último, Silberstein y McGeever explican que la propiedad de un objeto o sistema es epistemológicamente emergente, si la propiedad es reducible a, o determinada por las propiedades intrínsecas de los constituyentes últimos del objeto o sistema, mientras al mismo tiempo es muy difícil explicar, predecir o derivar tal propiedad sobre la base de los constituyentes últimos. En resumen, las propiedades epistemológicamente emergentes son nuevas solamente a nivel de descripción [Silberstein y McGeever 1999, pp. 186].

Stephan (1997, 1999, 2002) propone otra clasificación igualmente útil e interesante, basada sobre las 6 tesis que aceptan los diferentes tipos propuestos de emergencia. Partiendo de ello señala el tipo de noción emergentista manejada en diversos programas de investigación. Stephan comienza describiendo las tres tesis que soportan la noción más débil de emergencia (emergentismo débil): (1) el monismo físico, (2) las propiedades sistémicas, y (3) el determinismo sincrónico.

(1) “En el monismo físico, las entidades existentes o que llegan a ser tales, consisten únicamente de partes materiales. De ahí, las propiedades, las disposiciones, el comportamiento, o las estructuras clasificadas como emergentes son mostradas por sistemas consistentes exclusivamente de entidades físicas”. [Stephan 2002, pp. 79]

(2) “Propiedades sistémicas. Las propiedades emergentes son propiedades sistémicas, esto es, una propiedad es una propiedad sistémica si y sólo si un sistema la posee, pero no las partes constituyentes”. [Stephan 2002, pp. 80]

(3) “En la determinación sincrónica, las propiedades y disposiciones intrínsecas de un sistema dependen nomológicamente de su micro-estructura, es decir, de las propiedades de sus partes y su arreglo. No puede haber diferencia en las propiedades sistémicas (intrínsecas) sin que existan diferencias en las propiedades de las partes del sistema o en su arreglo”. [Stephan 2002, pp. 80]

La emergencia débil comprende las condiciones mínimas requeridas por las propiedades emergentes, por tanto, a partir de ella se construyen las versiones más fuertes.

El siguiente tipo de emergencia es la llamada emergencia diacrónica en sus cuatro modalidades, diacrónica débil, diacrónica fuerte, estructural diacrónica, y estructural diacrónica fuerte. Sobre todas ellas descansa la tesis de la innovación genuina (novedades genuinas, ya sean propiedades o estructuras, en evolución). Esta tesis sostiene lo siguiente:

“(4) Novedad. En el curso de la evolución, una y otra vez ocurren ejemplos de genuinas novedades. Entidades ya existentes forman nuevas constelaciones que producen nuevas estructuras las cuales pueden constituir nuevas entidades con nuevas propiedades y comportamientos”. [Stephan 2002, pp. 82]

Añadir al emergentismo débil la tesis de la novedad da por resultado un emergentismo diacrónico débil. El emergentismo diacrónico estructural se obtiene al añadir, además de la tesis de la novedad, la tesis de la impredecibilidad. Esta tesis enuncia lo siguiente:

“(5) Impredecibilidad. El surgimiento de nuevas estructuras es impredecible, en principio, si su formación es gobernada por las leyes del caos determinista. También, todas las nuevas propiedades que son mostradas por aquellas estructuras son impredecibles en principio”. [Stephan 2002, pp. 84]

El emergentismo diacrónico fuerte resulta de añadir al emergentismo diacrónico débil la tesis de la irreducibilidad, de igual manera, al añadir esta tesis al emergentismo diacrónico estructural, se obtiene el emergentismo diacrónico estructural fuerte. La tesis de la irreducibilidad propone:

“(6) Irreducibilidad. Una propiedad sistémica es irreducible si (a) su comportamiento no es ni micro ni macroscópicamente analizable, o si (b) el comportamiento específico de los componentes del sistema, de los cuales las propiedades sistémicas sobrevienen, no sigue del comportamiento de los componentes tomados por separado o en otra (simple) configuración”. [Stephan 2002, pp. 88-89]

Por último, tomando la emergencia débil y añadiéndole la tesis de la irreducibilidad se obtiene la emergencia sincrónica.

En resumen: la clasificación de Stephan distingue seis diferentes clases de emergentismo: débil, diacrónico débil, diacrónico fuerte, diacrónico estructural, diacrónico estructural fuerte, y sincrónico; además de seis supuestos: monismo físico, propiedades sistémicas,

determinismo sincrónico, novedad, impredecibilidad, e irreducibilidad. Esta clasificación se esquematiza así:

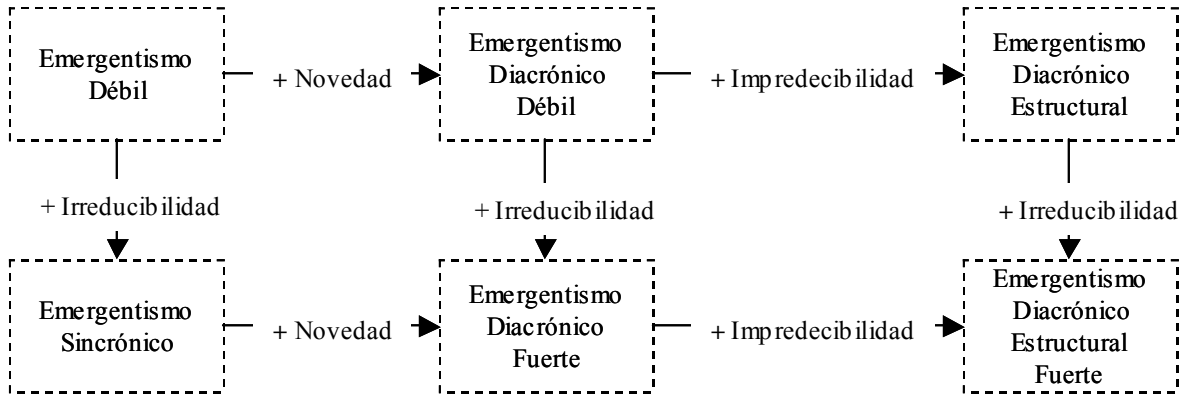


Figura 3.1. Relaciones lógicas sostenidas entre las diferentes versiones del emergentismo. Adaptado de Stepahn [1999, pp. 55].

Tomando como base la clasificación ofrecida por Stephan, un cuadro resumen final de las nociones emergentistas se puede construir así:

TIPO DE EMERGENTISMO	Tesis Defendidas	Compatible con Micro Determinismo	Compatible con Macro Determinismo	Compromiso Ontológico	Compromiso Epistemológico
Emergentismo Débil	(1), (2), (3)	X			X
Emergentismo Sincrónico	(1), (2), (3), (6)		X	X	
Emergentismo Diacrónico Débil	(1), (2), (3), (4)	X			X
Emergentismo Diacrónico Fuerte	(1), (2), (3), (4), (6)		X	X	
Emergentismo Diacrónico Estructural	(1), (2), (3), (4), (5)	X			X
Emergentismo Diacrónico Estructural Fuerte	(1), (2), (3), (4), (5), (6)		X	X	

Cuadro 3.1 Cuadro resumen de las diversas nociones emergentistas.

A la clasificación anterior –la cual podría resumirse como la tipificación de las diversas propuestas de emergencia determinista- hay que añadir un tipo más de emergencia. Stephan la omite intencionalmente por suponer que la mayoría de los emergentistas la considerarían de poca importancia [Stephan 1999, 53]. Esta es la emergencia indeterminista. Tal versión de emergencia (apoyada por O'Connor (2000, 2002, 2004), Bickhard (2000), y Silberstein y McGeever (1999)), parte de un cambio fundamental en la tesis sobre el monismo físico. El monismo físico, compartido por la mayoría de las propuestas emergentistas y expuesto por Stephan, sostiene un atomismo físico en el centro de su explicación; tal atomismo físico supone la continuidad causal y espacio-temporal, es decir, su metafísica admite un determinismo ontológico. El emergentismo indeterminista rechaza el atomismo físico y aviniéndose a una teoría de campos cuánticos sostiene la inexistencia de niveles fundamentales de partículas a partir de las cuales derivan todas las demás propiedades emergentes. Todo es organización de campos cuánticos.

Para finalizar, las versiones débiles de emergencia, sostiene Stephan, son utilizadas principalmente en las ciencias cognitivas, particularmente para la caracterización de las propiedades sistémicas y las redes conexionistas, y en la teoría de la auto-organización. El emergentismo sincrónico y el emergentismo diacrónico fuerte son importantes para la filosofía de la mente, principalmente para el debate del fisicalismo no reductivo y las cualidades. Las teorías del caos determinista en los sistemas dinámicos pueden ser reconocidas como un tipo de emergentismo estructural. Su perspectiva es, también, importante en la investigación evolutiva [Stephan 1999, pp.55].

3.1.7 El neo-emergentismo del proyecto Kauffmaniano

Antes de comenzar el análisis sobre el tipo de emergentismo planteado en la obra de Kauffman, resulta pertinente recapitular su proyecto. Las ideas centrales son las siguientes:

1. Identifica el tema del orden biológico como problema central y punto de partida de su investigación.

2. Pretende construir una teoría emergentista que dé cuenta del problema del orden biológico.
3. Espera descubrir leyes generales del orden emergente.
4. Utiliza las ciencias de la complejidad como fundamento para plantear tales leyes.
5. Explora la relación existente entre auto-organización y selección natural.
6. Sostiene la existencia de leyes fundamentales y complejas del orden emergente que rigen desde los fenómenos que dieron lugar al surgimiento de la vida hasta la regulación de la biosfera y la econosfera.

Para Kauffman, “el orden biológico” es la idea principal e hilo conductor de su proyecto, esto se puede apreciar cuando él se pregunta: ¿cómo y por qué ciertos elementos se relacionan con otros, y al hacerlo son capaces de mostrar un comportamiento estable, pero a la vez flexible, y en otros casos no?; ¿por qué de la innumerable cantidad de posibles formas de interacción entre una diversidad de moléculas sólo unas cuantas provocan propiedades como la vida? El orden biológico, para el proyecto Kauffmaniano, es el estado de organización de un sistema. Tal estado es percibido y discriminado por un sujeto [Hut *et al.* 1997]. En este sentido, la vida y su evolución son estados ordenados de organización³⁶, y dicha organización es el producto de la relación de ciertos elementos. La pregunta inmediata es: ¿qué tipo de relaciones provocan tales estados de organización?, y ¿son estas relaciones producto del azar u obedecen a leyes que las rigen?

Kauffman, como se pudo apreciar en el capítulo anterior, desecha la idea de que únicamente a partir de las mutaciones genéticas al azar, y un proceso de selección natural, es posible explicar el orden encontrado en la naturaleza. Él encuentra en la corriente emergentista el marco de referencia adecuado para encarar el problema de la formación de

³⁶ Wimsatt (1972, 1995, 1997) hace un análisis detallado sobre el problema de la organización y los niveles de organización. Por nivel de organización él entiende “la división composicional en niveles jerárquicos de elementos (paradigmáticamente, pero no necesariamente elementos materiales) organizados por relaciones parte-todo, en las cuales, los todos, en un nivel, funcionan como partes en el próximo (hasta el mayor) nivel” [Wimsatt 1995, pp. 212]. Cf. Wimsatt, W.: “The Ontology of Complex Systems”, *Canadian Journal of Philosophy*, 20, 1995, pp. 564-590.

estados de organización tales como la vida y la evolución biológica, que no resultan de la mera adición de las propiedades de sus constituyentes, o de alguna(s) de ellas. El emergentismo tradicional es, se puede decir, una caja negra que establece condiciones formales de posibilidad para la existencia de propiedades emergentes. Cuando Kauffman se compromete a construir una teoría emergentista, y a descubrir leyes biológicas del orden emergente, lo que expresa es su compromiso por abrir la caja negra de la emergencia y entender aquello que hace posible el surgimiento de las propiedades sistémicas. Las ciencias de la complejidad, que estudian el fenómeno de la auto-organización, son, desde su perspectiva, la herramienta más útil para llevar a cabo dicho cometido. Para Kauffman, la descripción de tales regularidades o leyes que permiten el surgimiento de propiedades emergentes a partir de un proceso auto-organizativo aplican tanto para las partículas como para los ecosistemas, en otras palabras, para todo fenómeno de organización que alcanza cierto umbral de complejidad. Kauffman plantea la necesidad de una teoría de la emergencia que *logre postular robustas leyes del orden*, dicho de otro modo, busca generalidades, no detalles, pues, para él, aunque no se conozcan los detalles de cada sistema, se pueden construir teorías generales que permitan explicar el surgimiento de propiedades sistémicas.

El emergentismo de Kauffman se puede resumir de la siguiente manera: *Existen leyes fundamentales complejas de organización que permiten el despliegue de nuevas propiedades a partir de sistemas de elementos (materiales) más básicos que cruzan cierto umbral de complejidad. Estas propiedades no son explicables a partir de las propiedades individuales de sus constituyentes ya que son poseídas por el todo y, a la vez, influyen sobre ese todo organizado.* Kauffman lo expresa así:

“ Creo que la vida misma es un fenómeno emergente, pero no quiero decir nada místico con ello [...] La vida es un fenómeno emergente que surge en tanto que la diversidad molecular de un sistema químico prebiótico va más allá de cierto umbral de complejidad. Si esto es verdad, entonces la vida no está localizada en las propiedades de ninguna molécula individual –en los detalles- sino que es una propiedad colectiva del sistema de interacción de las moléculas. La vida, desde este punto de vista, surgió completa y siempre ha permanecido completa. La vida [...] no está localizada en sus partes sino en las propiedades colectivas emergentes del *todo* que ellas crean [...] Ninguna fuerza vital o sustancia extra está presente en el *todo* auto-reproductor y emergente, sino que el sistema, en su colectividad, tiene una propiedad no poseída por

ninguna de sus partes, es capaz de auto-reproducirse y evolucionar. El sistema colectivo está vivo. Sus partes son sólo químicos” [Kauffman 1995, pp. 24].

“Espero persuadirle de que la vida es una propiedad natural de los sistemas químicos complejos, que cuando el número de moléculas, de diferentes tipos, en una sopa química, pasa cierto umbral, una red auto-sustentada de reacciones –un metabolismo auto-catalítico- repentinamente aparecerá” [Kauffman 1995, pp. 47].

“El secreto de la vida [...] no se encuentra en la belleza de la doble hélice de Watson y Crick sino en el logro de una clausura catalítica colectiva” [Kauffman 1995, pp. 48].

“Immanuel Kant, habiendo escrito hace más de dos siglos, vio los organismos como *todos*. El *todo* existió por medio de sus partes; las partes existieron por, y a fin de, mantener el *todo*. Este holismo ha sido [...] remplazado con la imagen del genoma como el agente central director que comanda la danza molecular. Un conjunto auto-catalítico de moléculas es tal vez la imagen más simple que uno puede tener del holismo de Kant. La clausura catalítica asegura que el *todo* existe por medio de las partes, y ellas están presentes por, y a fin de, mantener el *todo*. Los conjuntos auto-catalíticos exhiben la propiedad emergente del holismo” [Kauffman 1995, pp. 69].

Para determinar si el de Kauffman es un proyecto emergentista hay que establecer el cumplimiento de, al menos, tres tesis fundamentales: el monismo físico, las propiedades sistémicas, y el determinismo sincrónico:

(1) “En el monismo físico, las entidades existentes o que llegan a ser tales, consisten únicamente de partes materiales. De ahí, las propiedades, los arreglos, el comportamiento, o las estructuras clasificadas como emergentes son mostradas por sistemas consistentes exclusivamente de entidades físicas”. [Stephan 2002, pp. 79]

(2) “Las propiedades sistémicas. Las propiedades emergentes son propiedades sistémicas, esto es, una propiedad es una propiedad sistémica si y sólo si un sistema la posee, pero no las partes constituyentes”. [Stephan 2002, pp. 80]

(3) “En la determinación sincrónica, las propiedades y arreglos intrínsecos de un sistema dependen nomológicamente de su micro-estructura, es decir, de las propiedades de sus partes y su organización. No puede haber diferencia en las propiedades sistémicas (intrínsecas) sin que existan diferencias en las propiedades de las partes del sistema o en su arreglo”. [Stephan 2002, pp. 80]

En primer lugar, para Kauffman, las propiedades, el arreglo de elementos, los comportamientos, o las estructuras clasificadas como emergentes, son mostradas por sistemas consistentes, exclusivamente, de entidades físicas. Ya sea que se hable de una sopa prebiótica, o un sistema metabólico primitivo, desde un inicio, los componentes de la vida son simplemente químicos. De igual manera, el proceso evolutivo opera sobre una base física, no importa si se habla de replicadores, genes, módulos, u organismos.

Un organismo viviente es un sistema químico que tiene la capacidad de catalizar su propia reproducción [Kauffman 1995, pp. 49].

En este sentido, la postura de Kauffman se adhiere a la tesis del monismo físico; además, acepta la existencia de leyes fundamentales de determinación en el universo, y reconoce la importancia de las explicaciones reduccionistas.

“Si los físicos están en lo correcto, toda esta diversidad puede ser entendida únicamente como una consecuencia de las leyes fundamentales que han sido buscadas desde Kepler y Galileo [...] Esta, la más profunda de las esperanzas científicas, esta búsqueda por las leyes fundamentales, debe ser mantenida en su más profundo aspecto: es el ideal del reduccionismo en ciencia [...] Nosotros buscamos explicaciones reduccionistas. Los fenómenos económicos y sociales tienen que ser explicados en términos del comportamiento humano. A su vez, ese comportamiento tiene que ser explicado en términos de procesos biológicos, los cuales, a su vez, tienen que ser explicados por procesos químicos y ellos, a su vez, por procesos físicos”. [Kauffman 1995, pp. 16]

En segundo lugar, él reconoce la existencia de propiedades sistémicas emergentes, esto es, propiedades que no son poseídas por las partes constituyentes. Ejemplo de esto son sus modelos de conjuntos auto-catalíticos y redes genómicas booleanas. En los conjuntos auto-catalíticos, el sistema, al rebasar cierta masa crítica de relaciones, muestra un comportamiento no detectado en ninguno de sus elementos, es auto-sustentable y auto-replicante. Con las redes genómicas sucede algo similar. Los genes, en una red, pueden influir en la acción de otros genes, esta interacción entre genes llega a producir patrones de comportamiento estables, pero a la vez flexibles, no encontrados en los elementos constituyentes.

En tercer lugar, acepta que las propiedades de un sistema dependen de su micro-estructura, esto es, no hay diferencias en las propiedades sistémicas sin que existan diferencias en las propiedades de las partes, o en su arreglo. Una vez más, los conjuntos auto-catalíticos y las redes genómicas son un ejemplo válido. Un conjunto auto-catalítico es auto-sustentable porque sus elementos constituyentes producen la dinámica que, a su vez, produce al mismo sistema; y auto-replicante porque las moléculas producen otras moléculas que ayudarán a las primeras a seguir replicándose. En ausencia de las interacciones entre los elementos del micro-nivel, o de cambios en ellos, u operados a través de ellos, el sistema sería una sopa inerte de moléculas incapaces de producir propiedades emergentes. Por otra parte, los

patrones de comportamiento encontrados en una red genómica dependen de las interacciones de los elementos individuales; sin tales elementos no habría relación alguna, mucho menos patrones de comportamiento. Por tanto, tales patrones dependen de la micro-estructura genética para ser formados.

El emergentismo de Kauffman satisface las tres tesis fundamentales requeridas, a saber, el monismo físico, las propiedades sistémicas, y el determinismo sincrónico. Dado este cumplimiento, un emergentismo débil puede ser defendido a partir del proyecto Kauffmaniano. Recapitulando: el emergentismo débil es compatible con una postura micro-determinista, reduccionista, y de un compromiso básicamente epistemológico, no ontológico. A partir de aquí, el punto a debatir es si su proyecto emergentista tiene un mayor alcance, esto es, un alcance ontológico; si nos lleva hacia una propuesta diferente, no contemplada en la clasificación anteriormente propuesta; o si se limita a la posición más débil del emergentismo.

3.2 El alcance ontológico del proyecto

Las posiciones ontológicas del emergentismo se pueden encontrar ya sea en el emergentismo sincrónico, en el diacrónico fuerte, o en el emergentismo diacrónico estructural fuerte. El primero, se obtiene al añadir al emergentismo débil la tesis de la irreducibilidad (para los dos restantes es, también, una condición necesaria). En el emergentismo sincrónico, la relación entre las propiedades de un sistema y la micro-estructura de un sistema es lo que encuentra en el centro de interés. Para tal clase de emergentismo, la propiedad de un sistema se acepta como emergente sólo si ésta es irreducible. La irreducibilidad es parte fundamental del emergentismo ontológico. Recordemos: los elementos ontológicamente emergentes no son *ni reducibles ni determinados por elementos más básicos*. Los elementos ontológicamente emergentes son elementos de sistemas que poseen capacidades causales no reducibles a cualquiera de las capacidades causales intrínsecas de las partes ni a ninguna de las relaciones entre las partes [Silberstein y McGeever 1999, pp. 186]. Por ello, una explicación micro-determinista es inadecuada, y una macro-determinista es requerida.

El emergentismo sincrónico, como ya se apuntó, incluye la tesis de la irreducibilidad:

“(6) Irreducibilidad. Una propiedad sistémica es irreducible si (a) su comportamiento no es ni micro ni macroscópicamente analizable, o si (b) el comportamiento específico de los componentes del sistema, de los cuales las propiedades sistémicas sobrevienen, no sigue del comportamiento de los componentes tomados por separado o en otra (simple) configuración”. [Stephan 2002, pp. 88-89]

La irreducibilidad de propiedades sistémicas, siguiendo a Stephan [1999, pp.53], puede deberse a dos razones distintas. La primera implica el caso de la causalidad descendente, la segunda el epifenomenismo. Una propiedad sistémica es irreducible cuando sus capacidades causales no están completamente determinadas por las capacidades causales de las propiedades de los elementos que componen el sistema. Si las capacidades causales del macro-nivel afectan las del micro-nivel, entonces parece existir alguna *influencia causal descendente* del mismo sistema o de su estructura sobre el comportamiento de las partes del sistema. Por otro lado, si las propiedades sistémicas que dependen nomológicamente de su micro-estructura no son analizables y la estructura del sistema no tiene una influencia causal sobre las partes del sistema, entonces lo que se presenta es un epifenómeno. La segunda opción es rechazada por el emergentismo.

Esto nos lleva a proponer que la irreducibilidad de propiedades debe implicar algún tipo de causalidad descendente. Emmeche *et al.* (2000) distingue tres tipos de causalidad descendente: fuerte, media, y débil. La causalidad descendente fuerte sostiene que una entidad o proceso en un nivel dado puede, causalmente, infligir cambios o efectos en entidades o procesos de un nivel menor. [Emmeche *et al.* 2000, pp.18]. A su vez, la causalidad descendente media explica que una entidad en un nivel mayor llega a ser tal porque ocupa un estado específico entre otros posibles, con el estado previo del nivel mayor como factor de selección [Emmeche *et al.* 2000, pp. 24-25]. Por último, la causalidad descendente débil considera a los macro-niveles como estados de organización, no como substancias. La diferencia entre el micro y el macro nivel es de tipo organizativo. [Emmeche *et al.* 2000, pp. 31].

La noción de causalidad descendente es sostenida a partir, principalmente, de cuatro tesis: (1a) el reduccionismo constitutivo, (1b) el irreduccionismo constitutivo, (2a) el realismo

formal de niveles, y (2b) el realismo substancial de niveles [Emmeche *et al.* 2000, pp. 13-34].

“1a. Reduccionismo constitutivo. Ontológicamente, una entidad de mayor nivel (por ejemplo una célula) consiste de entidades pertenecientes a un nivel menor (la célula consiste de moléculas). Estas entidades de menor nivel constituyen el nivel mayor y están organizadas de cierta manera que produce las entidades de mayor nivel (la célula). Esto no significa que el nivel mayor puede ser reducido al menor (en cuyo caso ningún nivel sería relevante), sino que el nivel mayor no añade substancia alguna a las entidades del nivel menor.

1b. Irreduccionismo constitutivo. Ontológicamente, una entidad de mayor nivel es constituida por el nivel menor, pero, aun, si las entidades de menor nivel son una condición necesaria para el nivel mayor, este nivel mayor no puede ser reducido a la forma u organización de los constituyentes. Así, el nivel mayor constituye su propia substancia y no consiste meramente de sus constituyentes de menor nivel.

2a. Realismo formal de niveles. La estructura, organización o forma de una entidad es un elemento objetivamente existente e irreducible. La forma específica que caracteriza a una entidad de mayor nivel (organizando sus constituyentes de menor nivel) no puede ser reducida a las formas o substancias de menor nivel.

2b. Realismo substancial de niveles. Una entidad de mayor nivel es definida por una diferencia substancial de las entidades de menor nivel. Los aspectos morfológicos u organizacionales son una condición necesaria pero no suficiente de una entidad de mayor nivel. A través de la emergencia, se da un cambio ontológico en la substancia”. [Emmeche *et al.* 2000, pp. 16].

La causalidad descendente fuerte se basa en las tesis 1b y 2b. Considerando una célula como una entidad emergente sobre el nivel biológico y sobre su base física, a partir de la noción de causalidad descendente fuerte, asumimos que la emergencia de una célula como una sustancia viviente causa eficientemente cambios en las moléculas, haciéndolas, de alguna manera, específicamente biológicas, por ejemplo, substancialmente diferentes de las moléculas del mundo no-viviente, o, alternativamente, como si la célula –como tal– causara (eficientemente) cambios en las reacciones bioquímicas entre sus constituyentes. Puede resultar plausible que la célula gobierna o influye el proceso bioquímico que toma lugar en ella, pero al mismo tiempo la célula permanece en sí misma como un constructo bioquímico. Así que, a nivel bioquímico, nosotros no vemos sino reacciones bioquímicas individuales causándose unas a otras. No hay un proceso identificable a través del cual la célula (como tal, no bioquímicamente concebida) inflige una causa sobre la bioquímica. Este tipo de causalidad descendente no se ajusta a la noción de conjuntos auto-catalíticos ni

a la de redes genómicas propuesta por Kauffman. Un conjunto auto-catalítico es un sistema de moléculas en el cual éstas mismas pueden actuar dualmente, como sustrato para la reacción, o como catalizadores de ellas, todo esto con el aporte constante de moléculas-comida o alimentadoras. Las moléculas forman *ciclos de realimentación* dentro de un mismo grupo de moléculas, llámese a éste local. La clausura catalítica lograda en una célula en la cual se distinguen las propiedades emergentes como la auto-sustentación, la auto-replicación y la auto-reproducción, no detectadas en cada uno de los químicos constituyentes, de ninguna manera supone la existencia de cierta propiedad llamada vida que actúa sobre las moléculas de menor nivel (no vivientes) para influir en sus procesos bioquímicos, al menos esto no es lo que Kauffman quiere dar a entender. Su enfoque es más cercano a la idea de retroalimentación no-lineal, entendiendo por no-lineal el hecho de que un pequeño efecto sobre un elemento puede tener grandes consecuencias o viceversa. En abstracto, A y B pueden producir C , o acelerar la reacción que producirá C en un tiempo t , y C puede influir no-linealmente sobre lo que A y B producirán en un tiempo $t+1$. A , B , o C , actúan sobre sí mismos a través del todo que es el conjunto auto-catalítico. Estos ciclos de retroalimentación y clausura influyen sobre lo que sus elementos producirán en un tiempo posterior. En las redes genómicas sucede algo parecido, ellas se caracterizan por ser un arreglo de elementos interconectados, los cuales interactúan entre sí provocando la acción sobre otros elementos y sobre sí mismos a través de la propia red. La causalidad eficiente supuesta en la causalidad descendente fuerte no es la aproximación más adecuada para entender la posición emergentista Kauffmaniana, pues él no propone la existencia de sustancia o entidad alguna actuando directamente sobre el micro-nivel.

El siguiente tipo de causalidad, la causalidad descendente media, defiende la tesis 1b., esta tesis afirma que una entidad de nivel mayor es un fenómeno substancial real por derecho propio, y acepta 2a y 2b. El “interaccionismo emergente” de Sperry, y la causalidad descendente de Campbell son un claro ejemplo de esto. Campbell escribe:

Donde la selección natural opera a través de la vida y la muerte en un nivel mayor de organización, las leyes de sistemas selectivos de mayor nivel determinan, en parte, la distribución de los eventos y las sustancias de un nivel menor. La descripción de un fenómeno de nivel intermedio no se completa al ser descrita su posibilidad e implementación en términos de un nivel menor. Su presencia, predominio o distribución (todas requeridas para una explicación completa del fenómeno biológico)

requerirán, también, con frecuencia, referirse a leyes en un nivel mayor de organización [...] todos los procesos en un nivel menor de jerarquía son controlados y actúan en conformidad a las leyes de los niveles mayores [Campbell 1974, pp. 180; en Klee 1984, pp. 57].

Para Campbell, la selección natural es un claro ejemplo de esta posición. El medio³⁷ tomado como macro-nivel –nunca independiente del micro-nivel– actúa a manera de *restricción* sobre el nivel inferior, determinando, así, cuál genotipo sobrevivirá de generación en generación. Es cierto que el genotipo influye –y no solamente el genotipo– en la construcción del medio en el cual éste mismo se desarrolla; pero es el medio entendido como un todo, en última instancia, el que controla el proceso selectivo sobre el nivel inferior. En pocas palabras, desde esta perspectiva, podría decirse: el micro-nivel propone y el macro-nivel dispone, o, lo que es lo mismo, los genes proponen y el medio dispone [Castrodeza 2003, pp. 61].

El elemento clave en la noción de causalidad descendente media, siguiendo a Emmeche *et al.* [2000, pp. 24], es el de *restricción o condición límite*. Este concepto es principalmente utilizado en física y en matemáticas. Matemáticamente, una condición límite es el conjunto de criterios selectivos por medio de los cuales uno puede escoger una entre diferentes soluciones para un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen la dinámica de un sistema. En la mecánica clásica, las condiciones iniciales de un sistema son definidas como el conjunto de parámetros que describen el punto de partida de un sistema en un momento dado y el cual –medido con suficiente precisión– puede formar la base para el cálculo de una, en principio, predicción ilimitada de comportamientos del sistema. En los fenómenos físicos complejos se supone que un cambio en las condiciones iniciales provoca la formación de propiedades fundamentales para la dinámica del cambio; estas son nombradas “condiciones límite” porque delimitan el conjunto de condiciones iniciales dentro de las

³⁷ Tradicionalmente, el concepto de medio se ha entendido como una estructura independiente que se impone a los organismos, pero esta idea se ha ido modificando. Ejemplos de este cambio de perspectiva se encuentran en Lewontin quien manifiesta: “los genes de un organismo, en la medida que influyen en lo que el organismo consigue con su comportamiento, fisiología y morfología, contribuyen al mismo tiempo a construir el medio. De este modo, si los genes cambian en la evolución, el medio del organismo cambiará también” [Lewontin 1991, pp. 86; en Castrodeza 2003, pp. 57-58]; y otro en Levins y Lewontin: “El medio no es una estructura impuesta a los seres vivos desde el exterior sino que es, de hecho, una creación de esos seres vivos. El medio no es un proceso autónomo sino un reflejo de la biología de la especie” [Levins y Lewontin 1985, pp. 99; en Castrodeza 2003, pp. 58].

cuales las propiedades en cuestión serán encontradas. En este contexto el concepto no involucra la suposición de niveles.

En términos de niveles, las condiciones límite son concebidas como aquellas que seleccionan y delimitan las distintas posibilidades de desarrollo de un sistema. Que el sistema quede comprendido como un macro-nivel implica que una de las posibilidades de desarrollo ha sido seleccionada, y el conjunto de condiciones iniciales que produce el tipo de posibilidad escogida es, así, una condición límite llamada, también, *condición restrictiva*. Ellas sólo existen en fenómenos complejos de niveles múltiples, sobre un nivel mayor que el del nivel focal, y son las condiciones por las cuales las entidades en un nivel mayor restringen la actividad de un nivel focal menor. Sobre esta base, la causalidad descendente media puede entenderse así: “las entidades de un nivel mayor son condiciones restrictivas para la actividad emergente de los niveles menores. Y en un proceso, los estados de mayor nivel, ya delimitados, son condiciones restrictivas para los estados posteriores” [Emmeche *et al.* 2000, pp. 25]. El nivel mayor es caracterizado por principios organizacionales que tienen un efecto sobre la distribución de los eventos de menor nivel y las substancias.

¿Se ajusta esta idea de causalidad descendente media al emergentismo de Kauffman? Veamos. Una idea central en el proyecto de Kauffman es la noción de “umbral de complejidad”. Dicho umbral, se supone, se encuentra en una región entre el comportamiento ordenado y el caótico; en el límite del caos. Los conjuntos auto-catalíticos y las redes genómicas (redes booleanas) muestran comportamientos emergentes al cruzar cierto umbral de complejidad, tal cruce es caracterizado por una transición de fase en un espacio de estados. La interacción (K) de los elementos, y el número de ellos (N), lleva al sistema hacia una diversa gama de estados posibles (comprendidos en los atractores), de los cuales no todos provocan la estabilidad y flexibilidad mostrada por los sistemas vivientes. El estado que provoca los comportamientos de estabilidad y flexibilidad se logra, sugiere Kauffman, cuando los elementos del sistema (suficientemente diversos y adecuadamente interconectados) alcanzan cierto nivel de complejidad, este umbral es la condición límite o restrictiva de mayor nivel del sistema tomado como un “todo”, es el principio de organización que tiene efecto sobre el desarrollo de los eventos de menor nivel, en este

caso, la clausura catalítica y la adaptación de una población genética. Este umbral de complejidad se relaciona con los atractores del sistema; en sentido estricto, los atractores son las condiciones restrictivas del sistema.

Los atractores pueden ser el recurso de orden en sistemas dinámicos. Como este sistema sigue trayectorias que inevitablemente fluyen dentro de atractores, los atractores pequeños atraparán el sistema en pequeñas sub-regiones de su espacio de estados. Entre el gran rango de posibles comportamientos, el sistema se fija en unos cuantos ordenados. El atractor, si es pequeño, crea orden. De hecho, los atractores pequeños son un prerequisite para la estabilidad y flexibilidad que muestran los sistemas biológicos. Pero los atractores pequeños no son una condición suficiente. Para que los sistemas dinámicos sean ordenados deben exhibir homeostasis, esto es, deben resistir pequeñas perturbaciones. Los atractores son el último recurso para la homeostasis, asegurando que un sistema sea estable.

En este sentido, el emergentismo Kauffmaniano puede ajustarse a la idea de una causalidad descendente media, pero esto debe tomarse con las reservas necesarias por la consideración siguiente: las condiciones límite o restrictivas del sistema son alcanzadas por los atractores, un atractor es la descripción geométrica del comportamiento de un sistema, y en tal descripción no se plantean relaciones causales. Un atractor es una descripción geométrica matemática, la cual no tiene ningún estatus ontológico, es una mera representación. El peligro que se corre al asumir esta posición es argumentar un emergentismo ontológico sobre la base de una aproximación epistemológica, error, por cierto, muy común. Es un debate abierto el determinar si los atractores (ya sean extraños, de ciclo estable, o de otro tipo) pueden ocupar un estatus ontológico. En la medida en que esta aproximación pueda ser defendida, lo cual de ninguna manera se descarta, se justificará la causalidad descendente media como un componente del emergentismo expuesto por Kauffman, de otra manera, no.

Por último, la causalidad descendente débil, explica Emmeche *et al.* [2000, pp. 26], no admite ninguna de las dos afirmaciones anteriores (causalidad descendente fuerte, causalidad descendente media), y en lugar de ello interpreta el concepto a la luz de las tesis 1a y 1b. Un nivel mayor es visto como un nivel organizacional (no una substancia),

caracterizado por los patrones, la estructura o la forma en la cual los elementos constituyentes están organizados. La entidad de mayor nivel, por ejemplo una célula, consiste de entidades pertenecientes a un nivel menor (reduccionismo constitutivo), pero no implica un reduccionismo físico; las formas del nivel mayor, se asume, son irreducibles (realismo formal). La forma del nivel mayor puede, en términos de la teoría de los sistemas dinámicos en física, ser vista como un atractor caótico o estable en un espacio de fases donde el estado individual del sistema (los puntos en el espacio de estados) está dado por la organización de las propiedades de las entidades del sistema de menor nivel y por las ecuaciones dinámicas que rigen la evolución temporal del sistema.

El emergentismo de Kauffman, como ya se vio, tiene limitaciones para ajustarse a una noción de causalidad descendente media. *Si el emergentismo de Kauffman acepta algún tipo de causalidad descendente, esa es la débil.* El nivel mayor o macro-nivel no es una sustancia, es un nivel organizacional. Los conjuntos auto-catalíticos y las redes genómicas booleanas concuerdan con esta descripción. Un problema con la causalidad descendente débil, siguiendo a Emmeche [1997b], es que únicamente podemos hablar de una manera metafórica acerca de un espacio de estados de, por ejemplo, especies biológicas o estados psicológicos (pensamientos). No se pueden especificar tales estados físicamente o aplicar la descripción del espacio de fases en ningún sentido literal [Emmeche 1997b]. Además, al asumir que el macro-nivel no es una sustancia distinta a la del micro-nivel, sino simplemente una forma o nivel distinto de organización de los elementos que lo constituyen, entonces, los efectos causales pueden ser explicados a partir de los elementos del micro-nivel, siendo así asimilable con el micro-determinismo clásico del emergentismo epistemológico.

Resumiendo: de los tres tipos de causalidad descendente propuestos por Emmeche *et al.* (2000); causalidad descendente fuerte, causalidad descendente media, y causalidad descendente débil, *ésta última es la que mejor se ajusta a la postura emergentista de Kauffman.* Pero, cabe también aclarar, dicha postura es asimilable al micro-determinismo característico del emergentismo epistemológico porque, al ser considerado el macro-nivel no como una sustancia sino simplemente como un tipo de organización, concede que la propiedad del macro-nivel (de organización) está determinada completamente por los

elementos constituyentes de la micro-estructura, entonces, al no haber propiedades causales exclusivas del macro-nivel, no se puede sostener una explicación macro-determinista para el emergentismo, y, por tanto, no se puede sustentar la tesis de la irreducibilidad. Al no cumplir con la tesis de la irreducibilidad, el proyecto Kauffmaniano no soporta las versiones fuertes del emergentismo ontológico, a saber, el emergentismo sincrónico, el emergentismo diacrónico fuerte, y el emergentismo diacrónico estructural fuerte.

En el caso de que hubiera sido posible sostener una causalidad descendente media en el emergentismo de Kauffman, dos consecuencias sobre la interpretación de la tesis de la novedad y la impredecibilidad habrían tenido lugar. Primero, la novedad no sólo sería posible al nivel de descripción, se manifestaría, como lo afirma Bickhard (2000), en términos de nuevos y genuinos poderes causales, dando lugar a un macro-determinismo operado por las condiciones límite. Por otro lado, la impredecibilidad habría sido defendida desde un marco ontológico y no solamente epistemológico. Epistemológicamente, como ya se analizó en el apartado anterior, una propiedad es impredecible porque la micro-estructura de la que surge la propiedad es gobernada por las leyes del caos determinista. Ontológicamente una propiedad es impredecible porque aun conociendo con infinito detalle las propiedades de los elementos del sistema éstos no determinan las propiedades de mayor nivel.

3.3 El alcance epistemológico del proyecto.

El emergentismo epistemológico es parte de un modelo particular formal, generado por el análisis macroscópico, o por algún otro tipo de descripción de mayor nivel, de casos que potencialmente involucran la emergencia ontológica. La propiedad de un objeto o sistema es epistemológicamente emergente si la propiedad es reducible a, o determinada por las propiedades intrínsecas de los constituyentes últimos del objeto o sistema, mientras al mismo tiempo es muy difícil explicar, predecir, o derivar tal propiedad sobre la base de los constituyentes últimos. En resumen, las propiedades epistemológicamente emergentes son nuevas solamente a nivel de descripción.

Tomando esta precisión en cuenta, el primer tipo de emergentismo que se analizará será el diacrónico débil, el cual añade la tesis de la novedad:

“(4) Novedad. En el curso de la evolución, una y otra vez ocurren ejemplos de genuinas novedades. Entidades ya existentes forman nuevas constelaciones que producen nuevas estructuras las cuales pueden constituir nuevas entidades con nuevas propiedades y comportamientos”. [Stephan 2002, pp. 82]

Para Kauffman, la vida es una nueva propiedad de la materia, la cual, organizada y relacionada de cierta manera, produce una serie de rasgos distintivos, tales como la auto-sustentación, la auto-replicación, y la auto-reproducción, nunca antes mostrados por ninguno de sus elementos por separado. Otras propiedades como la diferenciación celular y la morfogénesis, comprendidas en el proceso de la ontogénesis, son, también, nuevas propiedades de la materia no mostradas antes del surgimiento de la vida. Ahora, ¿son nuevas propiedades sólo a nivel de descripción? Son posibles dos interpretaciones al respecto. La primera, respondería afirmativamente la pregunta, la segunda, no. Por lo pronto, se examinará la primera de ellas, dejando la segunda para el análisis del emergentismo fuerte en el próximo apartado.

Tomemos el problema de la emergencia de la vida, particularmente el caso de los conjuntos auto-catalíticos –modelo empleado por Kauffman para explicar el surgimiento de tal propiedad-. Un conjunto auto-catalítico es un sistema de moléculas que, en su interacción, pueden actuar como catalizadores para las reacciones y como productos de ellas. Así, las moléculas desempeñan un papel dual: pueden servir ya sea como ingrediente (sustrato) o producto de una reacción, y también, como catalizadores para otra reacción. Esta dinámica permite el desarrollo de ciclos de clausura catalítica. Habiendo definido lo que es un conjunto auto-catalítico no se debe perder de vista qué es lo que se pretende explicar con él. Por una parte, se quiere plantear el tipo de dinámica por medio de la cual un sistema de reacciones químicas logra auto-sostenerse, y, por otra, indicar de qué manera un conjunto de moléculas hace posible su auto-replicación.

Las moléculas del modelo de Kauffman constituyen la micro-estructura que permitirá las interacciones requeridas para la clausura catalítica. Kauffman no dudaría en afirmar la existencia de una relación causal entre la organización de tales moléculas en la micro-

estructura y la clausura obtenida; esto es, habiendo logrado un tipo especial de organización es posible alcanzar determinado umbral de complejidad. Pero la reorganización de esas moléculas no implica el surgimiento de otras nuevas, o la constitución de una nueva sustancia, sólo implica una nueva organización de la micro-estructura, la cual acepta una nueva descripción en términos de sus patrones globales de comportamiento, y no de las molécula individuales. *Al menos*, un nuevo tipo de organización de la materia, y un nuevo tipo de descripción es lo que se puede apreciar a partir del estudio de los conjuntos auto-catalíticos y las redes booleanas; siguiendo a Wimsatt (1997), esta postura puede ser compatible con el reduccionismo. Kauffman [1970, pp. 258-59] ha sostenido algunas tesis que podrían soportar esta apreciación, pero, finalmente, la restringen:

“Para tener diferentes descripciones de lo que un organismo está haciendo, podemos descomponerlo en partes, de diferentes maneras”. Kauffman [1970, pp. 258]

“No hay necesidad de una descomposición última tal que todas las demás descomposiciones sean deducibles a partir de ésta, aunque puede haber tal descomposición “última”. Kauffman [1970, pp. 259].

Entonces, la propuesta de Kauffman acepta, por lo menos, la novedad al nivel de la descripción, esto quiere decir que su proyecto mantiene, por lo pronto, un emergentismo diacrónico débil (epistemológico).

El siguiente análisis corresponde a la emergencia diacrónica estructural, la cual se obtiene al añadir a la tesis referente a la novedad, la tesis de la impredecibilidad:

“(5) Impredecibilidad. El surgimiento de nuevas estructuras es impredecible, en principio, si su formación es gobernada por las leyes del caos determinista. También, todas las nuevas propiedades que son mostradas por aquellas estructuras son impredecibles en principio”. [Stephan 2002, pp. 84]

La postura de Kauffman con respecto a la predicción de propiedades emergentes es poco clara, pues, por un lado, es consciente de, y acepta las limitaciones que a ello imponen ya sea una teoría cuántica, una teoría del caos determinista, o una teoría computacional:

La teoría cuántica impide la predicción detallada de los fenómenos moleculares [...] Incluso donde el determinismo clásico se mantiene, la teoría del caos muestra que pequeños cambios en las condiciones iniciales pueden conducir a profundos cambios de comportamiento en un sistema caótico. [Kauffman 1995, pp. 23].

Pero, a la vez, tiene la firme convicción, y es parte de su proyecto, encontrar nuevas leyes del orden emergente, esto es, de organización, que ayuden a predecir hechos generales, no particulares. Así lo describe:

Si, como yo creo, muchas de las propiedades robustas existen, entonces, profundas y hermosas leyes pueden gobernar la emergencia de la vida y la población de la biosfera [...] Nosotros no podemos nunca esperar predecir la exacta ramificación del árbol de la vida, pero podemos descubrir poderosas leyes que pueden predecir y explicar su forma general. Yo espero por tales leyes. Aún comparto la esperanza de que podremos comenzar a esquematizar algunas de ellas ahora. Buscando una mejor frase, más general, yo llamo a esos esfuerzos la búsqueda por una teoría de la emergencia”. [Kauffman 1995, pp. 23].

Dos ejemplos propuestos por Kauffman de leyes biológicas que podrían plantear algún tipo de predicción son los referentes a la relación entre genes y células tipo. Kauffman sugiere la hipótesis de que las células tipo son atractores en una red genómica. Si una célula tipo corresponde a un atractor de ciclo estable, entonces el ciclo de una célula puede ser pensado como una célula atravesando la longitud del ciclo del atractor. Y la escala de tiempo que resulta de atravesar el atractor es la escala de tiempo real del ciclo de la célula. Si esto es correcto, agrega Kauffman, entonces el tiempo de ciclo de la célula debería corresponder a la función de la raíz cuadrada del número de genes. Por otro lado, si una célula tipo es, nuevamente, un atractor de ciclo estable, entonces “deberíamos ser capaces de predecir el número de células tipo como una función del número de genes en un organismo” [Kauffman 1995, pp. 109]. El número de células tipo se incrementa como una función de la raíz cuadrada del número de genes³⁸.

Esta postura de Kauffman de ninguna manera afirma la posibilidad de predecir propiedades emergentes. En este caso, predecir propiedades emergentes no es determinar cuantas células tipo puede haber, sino que tipo de función realizarán. En esta línea, Kauffman no duda en aceptar la impredecibilidad de tal suceso. Para ser más preciso, al hablar de leyes

³⁸ Kauffman supone una cantidad de 100000 genes, el número total de genes existentes. La raíz cuadrada de 100000 es 316.22, digamos, 317. El número de atractores en una red de 100000 genes es 317. Tomando en cuenta su hipótesis y suponiendo que es correcta, en tal red, se puede predecir, existen 317 células tipo. Hasta el momento se han reconocido 256 células tipo, siguiendo este argumento, faltan algunas más por determinar. Si en lugar de 100000, la red genómica completa consta de 30,000 genes –como recientemente se ha planteado–, el número de células tipo en lugar de 317 sería, aproximadamente, de 174, menos de las, hasta ahora, detectadas. Con esto no se pretende probar si la ley propuesta por Kauffman es válida o no, pues el debate sobre el número de genes de la red genómica está abierto, lo que se quiere mostrar es el tipo de leyes que Kauffman pretende plantear y el tipo de predicción que argumenta.

fundamentales, esto es, regularidades, lo que él tiene en mente es la idea de patrones de organización *regulares* y *comunes*, que al mostrar ciertos comportamientos entre lo ordenado y lo caótico provocarán propiedades distintas a las de sus constituyentes, no importa si estos patrones de organización lo son de partículas atómicas, aminoácidos, cadenas de caracteres (0's y 1's), relaciones entre seres vivos, o flujos económicos. Aquello que hace emerger una propiedad sistémica, no importa de que tipo de sistema se hable, es común en el universo. El principio que permite tales tipos de organización debe ser uno de carácter fundamental, insensible a las particularidades y contingencias que cada sistema específico puede mostrar. Pero conocer tal principio no es condición suficiente para anticipar su amplia gama de consecuencias, como lo explica el estudio de los sistemas dinámicos deterministas no-lineales –caóticos. Kauffman lo resume de la siguiente manera.

[...] si nosotros encontráramos la teoría final, nosotros sólo habremos comenzado nuestra tarea [...] nosotros deberíamos, entonces, verdaderamente, comenzar a computar las consecuencias de dicha ley”. [Kauffman 1995, pp. 16].

Por ejemplo, si llegaran a encontrarse tales principios generales, serían útiles para describir propiedades ya existentes, como lo son la vida, y quizá la conciencia, pero no nos ayudaría a predecir una propiedad que, hasta el momento, desconocemos. Kauffman lo expresa así:

El próximo paso en la argumentación de que ninguna ley general podría predecir el comportamiento detallado de un sistema en no-equilibrio es simple [...] La teoría computacional parece implicar que los sistemas alejados del equilibrio pueden ser considerados como ordenadores llevando a cabo algoritmos. Para esa vasta clase de algoritmos, no se puede obtener ninguna descripción compacta de su comportamiento. [Kauffman 1995, pp. 22-23].

Si el origen y la evolución de la vida es como un algoritmo computacional incapaz de ser comprimido, entonces, en principio, no podemos tener una teoría compacta que prediga todos los detalles de lo no desplegado. Deberíamos, en lugar de ello, simplemente, permanecer atrás y ver el desfile. Sospecho que esta intuición puede probar ser correcta. Sospecho que la evolución misma es profundamente similar a un algoritmo imposible de comprimir [...] Y aún, si es verdad que la evolución es un proceso no comprimible, esto no implica que no podemos encontrar profundas y maravillosas leyes que gobierna ese flujo impredecible. [Kauffman 1995, pp. 23].

Esta distinción permite ubicar en su justa dimensión, por un lado, la intención mostrada por Kauffman al buscar “leyes del orden” y, por el otro, la interpretación de su posición con respecto a la posible predicción de propiedades emergentes. Las propiedades emergentes

son impredecibles. De aquí, su compatibilidad con la tesis de la impredecibilidad se sostiene. Por tanto, el emergentismo diacrónico estructural es compatible con su proyecto emergentista.

El trabajo desarrollado por Kauffman, como se ha podido apreciar, es compatible con un emergentismo epistemológico, el cual es considerado como la posición más débil, o dicho de otra forma, la posición menos radical. La otra es el emergentismo ontológico. Siguiendo la clasificación de Stephan, el de Kauffman es un emergentismo diacrónico estructural, pues, además de las tres tesis básicas que constituyen la posición más débil del emergentismo, acepta la tesis de la novedad y la impredecibilidad. Este tipo de emergentismo es compatible con el micro-determinismo [Wimsatt 1972, 1996; Stephan 2002; Kim 1999; Klee 1984; Silberstein y McGeever 1999], y, por tanto, con un análisis reduccionista. Pero Kauffman tiene una aproximación holista con respecto al problema del origen de la vida. Recordemos:

“El secreto de la vida [...] no se encuentra en la belleza de la doble hélice de Watson y Crick sino en el logro de una clausura catalítica colectiva” [Kauffman 1995, pp. 48].

“Los conjuntos auto-catalíticos exhiben la propiedad emergente del holismo” [Kauffman 1995, pp. 69].

“La vida [...] no está localizada en sus partes sino en las propiedades colectivas emergentes del todo que ellas crean [...] el sistema en su colectividad tiene una imponente propiedad no poseída por ninguna de sus partes. Es capaz de auto-reproducirse y evolucionar. El sistema colectivo está vivo. Sus partes son sólo químicos” [Kauffman 1995, pp. 24].

A partir de estas apreciaciones sobre el alcance ontológico y epistemológico del proyecto emergentista Kauffmaniano se puede retomar la pregunta inicial: ¿qué lugar ocupan las aportaciones de Stuart Kauffman dentro de dicha doctrina?, es decir, ¿la amplían, la restringen, la refuerzan, o la reorientan?

Desde la primera etapa de la doctrina emergentista, y su continuación en el neo-emergentismo hacia el final del siglo XX, y principios del XXI, se han manejado diversos criterios (tesis) para delimitar la noción de emergencia. La aceptación de la postura determinista, materialista, y acerca de las propiedades sistémicas es común en la mayor parte de los trabajos realizados sobre la doctrina emergentista. El proyecto de Kauffman no

es la excepción. Sobre esta base se han añadido tres tesis, a partir de las cuales se comienzan a distinguir diferentes posturas y matices con respecto a la noción de emergencia. Durante el desarrollo de la doctrina emergentista diversos autores han resaltado y puesto mayor énfasis en alguno de estos criterios: novedad, impredecibilidad, e irreducibilidad. Dependiendo de cual sea privilegiado, la posición se cataloga como débil o fuerte, epistemológica u ontológica, micro-determinista o macro-determinista, sin olvidar la indeterminista. En general, estas son las coordenadas en las cuales se mueve la discusión acerca del emergentismo. Ahora, en referencia a la pregunta inicial: ¿el proyecto Kauffmaniano, de alguna manera, amplía la doctrina emergentista? Tomando en cuenta los puntos sobre los cuales se mueve la discusión, el proyecto de Kauffman no sugiere la adición de un nuevo elemento, pues queda perfectamente circunscrito al plano descrito. Por tanto, no lo amplía. Por otro lado, si clasificamos el emergentismo en términos de su alcance filosófico como ontológico o epistemológico, el proyecto de Kauffman se ubica en el terreno del emergentismo epistemológico. Pero esto no quiere decir que restringe – respondiendo a la segunda pregunta planteada- la doctrina emergentista, ya que en ningún momento se contrapone a la posibilidad de un emergentismo ontológico; lo que queda delimitado o circunscrito es su proyecto.

Si el trabajo de Kauffman no amplía el marco emergentista, y es discutible, por el momento, soportar a partir de éste un emergentismo ontológico, podría pensarse que aporta muy poco; pero no es el caso, pues refuerza y reorienta el emergentismo epistemológico, lo cual no es un asunto menor. A diferencia de sus predecesores, Alexander, Morgan, y Broad, Kauffman ha ido más allá del debate sobre la mera posibilidad de la emergencia. La gran aportación de Kauffman a la corriente emergentista es el trabajo que ha desarrollado para describir e interpretar los procesos de organización por medio de los cuales la emergencia de una propiedad es posible. Las teorías de la complejidad, la mecánica estadística y los modelos de simulación son las herramientas utilizadas por él para ofrecer distintas interpretaciones del surgimiento de las propiedades biológicas emergentes. Kauffman estaría de acuerdo con Bedau (1997) en cuanto a que el principal objetivo en una defensa de la noción de emergencia es mostrar que el estudio de los procesos que permiten el surgimiento de propiedades emergentes es útil para las ciencias empíricas. McLaughlin (1990) atribuye la caída del emergentismo inglés a motivos empíricos más que a motivos

filosóficos. Kauffman, entre otros, ha contribuido al resurgimiento del emergentismo más por motivos empíricos que por motivos filosóficos. A su favor [Kauffman 1996b, pp. 496-497] se encuentra la evidencia mostrada en el laboratorio por Lee *et al.* (1996, 1997), y Yao *et al.* (1998), sobre la posibilidad de llevar a cabo la auto-replicación de un sistema polipéptido por medio de la auto-catálisis de sus elementos (sin la necesidad de un genoma o enzimas catalizadoras). Estos logros, apenas incipientes, abren la posibilidad para suponer, justificadamente, que:

1. La vida es una propiedad de la materia que tiene más probabilidades de surgir de lo que se había pensado anteriormente.
2. Para el surgimiento de propiedades emergentes es necesario alcanzar cierto nivel de complejidad en la organización de cierto sistema.
3. Los métodos para la búsqueda de vida en lugares distintos a la tierra cambiarán de manera radical; además, estos tipos de vida no necesariamente estarán basados en la bioquímica del ADN.
4. El desarrollo de proto-células en el laboratorio es una posibilidad real, así como también, el desarrollo de nuevas proteínas, y con ello, la creación de nuevas vacunas, enzimas, y medicamentos.

Si no llegaran a establecerse las leyes del orden por las cuales el proyecto de Kauffman busca, éste no debe ser considerado un fracaso. La propuesta teórica de Kauffman ha mostrado ser capaz de generar conceptos útiles tales como: auto-organización, evolución en el límite entre el orden y el caos, atractores y contenedores de atracción, entre otros, para entender e interpretar procesos de organización, y en especial los biológicos. Esta capacidad de generar conceptos, y no la de postular leyes, siguiendo a Mayr, es la principal fuente para el avance y desarrollo de la biología.

3.4 El proyecto Kauffmaniano: ¿un cambio de paradigma para la Biología y sus raíces filosóficas?

Hasta este momento se han desarrollado dos objetivos básicos: plantear y describir el proyecto Kauffmaniano, y analizar éste a la luz de la doctrina emergentista que tuvo sus inicios en el siglo XIX y su continuación en el neo-emergentismo hacia finales del siglo XX y principios del XXI. El tercer objetivo, y principal en esta investigación, es analizar, por una parte, la radicalidad de su proyecto en términos de la noción Kuhniana de *revolución científica*, en términos de *los programas de investigación científica* de Lakatos, y en términos de *los estilos de razonamiento científico* de Hacking; y, por otra, describir las implicaciones que tiene su proyecto con respecto al problema de la dependencia o independencia entre la ciencia física y la biológica, o mejor dicho, su relación, y con ello, la aportación del proyecto Kauffmaniano a una defensa del antirreduccionismo en el campo de la biología. Para ganar en claridad, el presente apartado se referirá al primer problema, el segundo, será abordado en el siguiente y último apartado. Fijada la meta, hay que argumentar la razón por la cual, en primera instancia, el proyecto emprendido por Kauffman se puede considerar, en un sentido general, revolucionario.

En primer lugar, Kauffman ha utilizado *las ciencias de la complejidad y el caos* como herramientas para plantear su proyecto de investigación, en sus palabras: “estas ciencias pretenden transformar las ciencias biológicas y sociales en los siglos por venir” [Kauffman 1990, pp. 299]. Hayles [1998, pp. 215] argumenta que la teoría del caos representa un cambio de paradigma –en el sentido Kuhniano- porque a diferencia del paradigma Newtoniano, que pone énfasis en aislar la unidad apropiada para comprender los mecanismos que ligan a las unidades en grupos mayores, la teoría del caos busca explicar las regularidades de los sistemas, regularidades que no son explicables a partir del conocimiento del comportamiento de las unidades individuales sino de la comprensión de las correspondencias a través de diferentes escalas y longitudes (geometría fractal). “El supuesto fundamental de la teoría del caos es que la unidad individual no importa” [Hayles 1988, 215]. En este sentido, las explicaciones en términos de estos dos paradigmas no sólo son diferentes, son inconmensurables. Tomando ahora, particularmente, el proyecto Kauffmaniano, su radicalidad y alcance han sido discutidos desde diferentes perspectivas,

entre otros, por: Burian y Richardson (1991), Dover (1993), Alberch (1994), Weber y Depew (1996), Weber (1998, 1999), Richardson (2001), y Castrodeza (2002). Por ejemplo, Castrodeza resalta el enfoque determinista del proyecto; reconoce que amplía la discusión teórica de la biología del siglo XXI al incluirse en el debate científico nuevas teorías (de la complejidad) aplicadas sobre la base de viejos marcos de explicación (la biología antes de Darwin), y, a su vez, no rechaza la posibilidad de que la selección natural se puede beneficiar de las leyes complejas o de auto-organización, tal y como lo propone Kauffman. Por otra parte, Burian y Richardson destacan la radicalidad del proyecto Kauffmaniano en el sentido de llevar a la biología de ser una ciencia de la función a ser una ciencia de la forma:

“El Origen del Orden de Kauffman pretende transformar la biología en una ciencia de la forma, una transformación la cual, creemos, será un foco de debate en los tiempos por venir”. [Burian y Richardson 1991, pp. 285].

De Kauffman, en una primera lectura de su trabajo, se puede tener la impresión de que asume distintas posiciones con respecto a su mismo proyecto, como se puede notar a continuación:

“En sistemas lo suficientemente complejos la selección no puede evitar el orden exhibido por los miembros del ensamble. Por lo tanto, tal orden se presenta no por causa de la selección sino a pesar de ésta”. [Kauffman 1993, pp. 16]. [Énfasis original].

“No es que Darwin esté equivocado, sino que él mantiene sólo parte de la verdad”. [Kauffman 1993, pp. xiii].

“Si comenzamos a vislumbrar los orígenes del orden en las propiedades inherentes de los sistemas complejos, entonces debemos comenzar a entender las interacciones mutuas de tales propiedades auto-ordenadas y las acciones de la selección. Aún no se dispone de una teoría adecuada, pero debe ser encontrada; el propio casamiento de estos campos conceptuales constituye la propia evolución de nuestra teoría de la vida”. [Kauffman 1993, 644].

Weber y Depew [1996, pp. 44] proponen una serie de posibilidades para interpretar el trabajo de Kauffman:

1. Es la selección natural, y no la auto-organización, la que conduce la evolución.
2. La auto-organización restringe la selección natural.

3. La auto-organización es la hipótesis nula contra la cual el cambio evolutivo debe ser medido.
4. La auto-organización es un auxiliar de la selección natural para causar el cambio evolutivo.
5. La auto-organización conduce la evolución, pero es restringida por la selección natural.
6. La selección natural misma es una forma de auto-organización.
7. La selección natural y la auto-organización son dos aspectos de un único proceso evolutivo.

Richardson y Burian (1991), y Richardson (2001), sostienen que el trabajo de Kauffman debe ser interpretado a la luz de las alternativas 6 ó 7, las cuales son, a partir de su análisis, las más radicales. Las alternativas 6 y 7, pero aún más claramente la alternativa 6, nos lleva a entender la selección natural como un caso especial de las propiedades auto-organizativas de la materia. La auto-organización puede darse en sistemas físicos no vivientes, la selección natural, no. A partir de esta postura, la corriente radical –representada, entre otros, por Goodwin (1998)- a favor de la biología del desarrollo (*developmental biology*)³⁹ está de acuerdo en afirmar que el orden (desarrollo de los seres vivos) observado en la naturaleza es producto de las leyes físicas complejas encontradas en los procesos de auto-organización. Así lo expresa B. Goodwin:

La “nueva” biología adopta la forma de una ciencia exacta de los sistemas complejos concernientes a la dinámica y el orden emergente. A partir de aquí todo cambia. En vez de metáforas de conflicto, competencia, genes egoístas o picos dentro de relieves adaptativos, lo que tenemos es una danza evolutiva [...] Es una danza a través del morfoespacio, el espacio de las formas orgánicas. [Goodwin 2000, pp. 89].

Para Burian y Richardson, como ya se apuntó, el proyecto Kauffmaniano nos lleva hacia una biología del desarrollo o de las formas que se acerca más hacia lo que es una ciencia de leyes, ahora, de la complejidad. Ésta posición radical que describen Burian y Richardson

³⁹ “Éstas alternativas desarrollistas se remontan al menos a Geoffroy Saint-Hilaire, Karl Ernst von Baer, y Richard Owen a principios del siglo XIX, e incluye como representantes contemporáneos no sólo a Stephen Jay Gould, sino a biólogos tales como Pere Alberch, Brian Goodwin, Stanley Salthe, Steven Stanley, Gerry Webster, y Bruce Weber; y filósofos como David Depew, y William Wimsatt. El desarrollo impone limitaciones independientes sobre el cambio evolutivo limitando el rango y el significado de las variaciones biológicas”. [Richardson 2001, pp. 656].

[1991, pp. 284-285], se remonta a la ciencia natural que precedió a los trabajos desarrollados por Darwin: una biología ocupada de clasificar las formas vivientes, esto es, centrada en el estudio de la morfología y el desarrollo de las plantas y los animales. Se aceptaba que las leyes físicas o *leyes de la forma* explicaban las restricciones y posibilidades del desarrollo biológico. En este sentido, proponen Burian y Richarson, el proyecto de Kauffman busca las *leyes de la forma* que explican la generación del orden existente en la naturaleza, pero a diferencia de sus predecesores, las leyes físicas a las cuales él apela son leyes complejas que rigen los procesos de la auto-organización de los sistemas dinámicos complejos. Este punto de vista toma distancia del paradigma evolutivo vigente que tiene por base la teoría sintética (selección-herencia) de la evolución, y a su vez, ésta postura no captura en toda su extensión el proyecto desarrollado por Kauffman, ya que en éste, en ningún momento, se rechaza la selección natural, las variaciones hereditarias, ni las mutaciones en las redes genómicas, para explicar el proceso evolutivo.

Por otro lado, Weber (1999) expone un punto de vista distinto:

“La selección no tiene por qué hacer todo, ni siquiera de una manera gradual, ya que la selección puede ser aliada de la auto-organización para generar orden y organización, algunas veces de una manera global [...] Claramente, la auto-organización tampoco tiene por qué hacerlo todo por sí misma. Ni debería ninguna persona racional esperar que el azar únicamente pudiera generar orden a partir del caos. Debería considerarse la acción conjunta de las tres, en distintos grados, en ejemplos específicos, a fin de generar explicaciones robustas de la emergencia”. [Weber 1999, pp. 600].

Ésta posición más conciliadora y, en apariencia, menos radical, es la que describe con mayor proximidad el proyecto Kauffmaniano, pues lo retoma en toda su amplitud y a lo largo de sus distintas exposiciones en el transcurso del tiempo. A diferencia de lo que en una primera aproximación podría parecer, considerar el proyecto Kauffmaniano en estos términos es la forma más ambiciosa de hacerlo por la siguiente razón: *el proyecto Kauffmaniano es de suma importancia no porque se radicalice en contra de una teoría evolucionista basada en las teorías de la selección natural y la herencia, llamado también el paradigma neo-darwinista, sino porque pretende establecer una nueva síntesis, esto es, integrar en un mismo marco explicativo la biología del desarrollo y la biología evolutiva, y esto sobre la base de una forma distinta de abordar, razonar y desarrollar el problema del orden biológico.*

La teoría evolutiva neo-darwinista toma la propiedad de *la vida* como un hecho dado, y a partir de él comienza su explicación. Darwin en su *Sobre el Origen de las Especies* (2000 [1859]) no dice palabra alguna sobre cómo surgió la vida. Si el mecanismo genético sobre el cual actúa la selección sólo ha aparecido con el surgimiento de la vida, ¿de dónde provino este mecanismo?; de un hecho fortuito, del azar –responderían los neo-darwinistas. Pero existe una restricción para este argumento: *el tiempo*. ¿Cuánto tiempo se requeriría para ensamblar pieza por pieza y por medio de un proceso aleatorio un sistema capaz de auto-replicarse, auto-mantenerse, reproducirse y evolucionar? Kauffman está convencido de que quince mil millones de años no son suficiente [Kauffman 1982, pp. 292]. Dada esta limitación, la característica que tienen los sistemas físicos complejos para organizarse –la auto-organización- es un elemento que debe ser considerado para explicar el origen y la evolución de la vida. La auto-organización genera el tipo de estructuras que se pueden beneficiar de la selección, genera estructuras que son sólidas y estables. Esta solidez es lo que le permite a los organismos ser moldeados por la acumulación de variaciones. Las estructuras estables y los comportamientos son aquello que puede ser moldeado. Si esto es correcto, entonces lo que es auto-organizado y resistente (que permite variaciones, pero que no es extremadamente sensible a cualquier variación) es lo que probablemente es utilizado por la selección [Kauffman 1995, pp. 188]. Estos dos recursos de orden son patrones naturales. Las redes genómicas yacen en un régimen ordenado, quizá cerca del límite del caos (región en donde la heredabilidad es posible y la capacidad para evolucionar se maximiza gracias a la selección natural), porque tales sistemas son estructural y dinámicamente estables, así, ellas se adaptan sobre paisajes correlacionados y son capaces de ser moldeadas. Esta es la estabilidad y flexibilidad descrita por los modelos, y observada en la naturaleza. Auto-organización y selección no se contraponen, se complementan.

Desde este punto de vista, la síntesis Kauffmaniana no pretende reducir la biología a un puñado de leyes físicas o a una ley física fundamental que sea capaz de describir la interacción molecular, ni tampoco pretende excluir la física del campo de la biología; el proyecto de Kauffman es un claro ejemplo de la posibilidad de integrar la física y la biología, y el marco para entender esta integración es la doctrina emergentista. Recapitulando: el proyecto Kauffmaniano puede considerarse revolucionario porque plantea, en el campo de la biología teórica, la posibilidad de una nueva síntesis entre la

biología del desarrollo y la biología evolucionista *sobre la base de una forma distinta de abordar, razonar y desarrollar el problema del orden biológico*, esta nueva síntesis, en el caso de concretarse, ayudaría a soportar una posición no-reduccionista en el debate reduccionismo/antirreduccionismo, y, por tanto, un argumento que permitiría aclarar el problema de la dependencia o independencia entre las ciencias física y biológica o, mejor dicho, su relación. Cómo concretar tal síntesis es todavía un problema abierto; el proyecto Kauffmaniano es un ambicioso bosquejo para tal objetivo.

Si el proyecto es, en los términos anteriormente descritos, lo suficientemente ambicioso y bosqueja la integración de dos corrientes antagónicas de la biología teórica, la pregunta que hay que plantear es la siguiente: ¿puede el proyecto Kauffmaniano catalogarse como una revolución científica en el campo de la biología teórica? Para responder esta cuestión hay que referirse al trabajo desarrollado por Kuhn sobre *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. Kuhn sostiene en su obra que los grandes cambios científicos no ocurren en los términos objetivistas asumidos por el cientificismo tradicional, esto es, la aceptación de una nueva teoría sobre otra no ocurre porque ésta resuelve las preguntas que su rival no logra contestar, o porque es más sencilla y ofrece el mismo poder de explicación, o porque ésta refuta con un nuevo experimento crucial a su oponente. En lugar de ello ocurre un cambio de paradigma. Para Kuhn, las revoluciones científicas son el desarrollo de episodios no acumulativos en el cual el viejo paradigma es remplazado en su totalidad, o en parte, por uno nuevo que viene a ser incompatible con el anterior (Kuhn, 1963). Kuhn lo describe de este modo:

“Cuando los paradigmas entran, como deben hacerlo, en un debate sobre cuál paradigma elegir, su rol es necesariamente circular. Cada grupo usa su propio paradigma para argumentar en defensa de ese mismo paradigma [...] este problema de la elección de paradigma nunca puede ser inequívocamente fijado sólo por lógica o por experimentos” [1963, pp. 93].

Kuhn continúa:

“En los argumentos parciales y circulares, que regularmente resultan, cada paradigma habrá mostrado satisfacer más o menos los criterios que dictan para sí [...] pero dado que aún ningún paradigma resuelve todos los problemas que estos definen, y ninguno de los dos paradigmas deja los mismos problemas sin resolver, los debates sobre los paradigmas siempre involucran la pregunta: ¿qué problema es más significativo haber

resuelto? [...] esa pregunta de valores sólo puede ser respondida en términos de criterios que se encuentran fuera de la ciencia en su conjunto, y es este recurrir a criterios externos lo que hace a los debates sobre paradigmas ser revolucionarios” [1963, pp. 109].

Una consecuencia de este rompimiento es que un cambio de paradigma no puede ser racionalmente justificado [Purtill 1967, pp. 54)].

Kuhn define tres características principales que son encontradas en las revoluciones científicas:

1. El rechazo de una teoría (paradigma) vigente por otra incompatible con ésta.
2. Un cambio en los problemas disponibles para el escrutinio científico y en los estándares por medio de los cuales son juzgados estos problemas y sus soluciones.
3. Una transformación en la “imaginación” científica; esto es, la manera en cual se ven, entienden e interpretan los fenómenos que se encuentran en estudio, mejor descrita como una transformación del mundo dentro del cual el trabajo científico es hecho.

Dadas estas características se puede formular la pregunta: ¿puede el proyecto Kauffmaniano ser catalogado como una revolución científica en el campo de la biología teórica porque se ajusta a las características principales definidas por Kuhn?

Para responder esta pregunta es necesario analizar el proyecto Kauffmaniano en términos de los tres criterios anteriormente planteados. Comenzando con el primer criterio, referido al rechazo de una teoría (paradigma) vigente por otra incompatible con ésta, se debería mantener que, en este caso, el paradigma vigente de la biología teórica, a saber, la teoría evolucionista sintética (selección-herencia) o neo-darwinista, debería ser rechazada por el proyecto Kauffmaniano, dado que éste debe ser incompatible o inconmensurable con respecto a la teoría vigente. El proyecto Kauffmaniano, que pretende ser una nueva síntesis entre la biología del desarrollo y la biología evolutiva, no rechaza, sin embargo, la validez del principio de selección natural ni las variaciones hereditarias; por otro lado, la teoría vigente tampoco ha entrado en una crisis interna en la cual algunos de sus supuestos socavan la práctica cotidiana de las actividades normales de resolución de problemas.

El paradigma Kauffmaniano sostiene que la materia tiene la capacidad, bajo ciertas condiciones, para organizarse a sí misma y a partir de esto crear metabolismos o estructuras estables correlacionadas. Las estructuras en las cuales un estado inicial y uno posterior modificado están correlacionados permiten la existencia de variaciones heredables. En las redes caóticas no hay correlación de estados, por tanto, no hay heredabilidad. En una red ordenada simplemente no hay variaciones. En una región en el límite del caos es donde las correlaciones, y, por tanto, las variaciones heredables, indispensables para la evolución, son posibles. La capacidad para evolucionar se maximiza en el borde del caos. Ahora, la selección natural es la que alcanza y sostiene este estado posicionado en el límite del caos. La selección natural maximiza las variaciones heredables. La adaptación es el proceso por el cual se maximiza la capacidad para evolucionar (*evolvability*) –también llamada adaptabilidad-, que no es otra cosa sino la cantidad de variación heredable [Richardson 2001, pp. 678-679]. Dicha adaptabilidad sólo se logra a partir de estructuras auto-organizadas sobre las cuales opera la selección natural y las variaciones heredables. Descrito someramente así el paradigma Kauffmaniano, se puede apreciar que los supuestos del paradigma neo-darwinista no son rechazados. Pero, aunque no son rechazados, ¿supone esta ampliación de la explicación evolutiva la reconstrucción del campo de la biología a partir de nuevos fundamentos, una reconstrucción que cambia algunos de los campos más elementales de las generalizaciones teóricas? [Kuhn 1963, pp. 85].

Responder esta pregunta no es sencillo, pues aún el estudio de los sistemas complejos está en sus etapas iniciales, y la pretendida nueva síntesis es apenas un bosquejo; pero la respuesta es negativa. Si tomamos como referencia la biología molecular, no hay nada en el proyecto de Kauffman que ponga en duda, por ejemplo, cuál es la función del ADN y el ARN en la síntesis de las proteínas, no queda en entredicho el mecanismo de replicación, ni tampoco echa por tierra la teoría acerca de que los genes pueden influir en la actividad de otros dentro de una red genómica, tal y como lo describieron Jacob y Monod en su momento, por el contrario, retoma ese principio como parte fundamental para el desarrollo de sus modelos de redes booleanas, además, en un sentido más amplio, tampoco rechaza el principio acerca de que todos los seres vivos descendemos de un ancestro común o de un único árbol de la vida (principio fundamental del evolucionismo), ni rechaza el principio fundamental de selección natural. Por otra parte, el proyecto Kauffmaniano se desarrolla

dentro de la tradición de la doctrina emergentista. La doctrina emergentista supone un fisicalismo no reductivo [Crane 2001], y este fisicalismo no reductivo *representa el paradigma imperante en la filosofía de la biología* [Rosenberg 1997, pp. 445]. Kauffman tampoco rechaza este paradigma vigente, por el contrario, es parte fundamental de su proyecto, en este sentido, el proyecto de Kauffman no entra en conflicto con el paradigma vigente en la filosofía de la biología. Por lo anteriormente argumentado, se puede afirmar que el proyecto desarrollado por Kauffman no satisface la primer característica descrita por Kuhn.

En lo que atañe a la segunda característica, referida a que una revolución científica supone cambios en los problemas disponibles para el escrutinio científico y en los estándares por medio de los cuales son juzgados estos problemas y sus soluciones, el proyecto Kauffmaniano tiene importantes elementos que deben ser evaluados. El tema central de Kauffman es el de la organización; en su proyecto, la organización involucra los problemas de la *forma (estructura)* y la *función (lo que hace la estructura)*. Estos elementos habían sido privilegiados uno sobre otro, dependiendo del marco teórico asumido: los pre-darwinistas la forma y los post-darwinistas la función. Para Kauffman, la organización no es un problema de unidades; esto es, los elementos, por fundamentales que sean, no son capaces de explicar el comportamiento de un sistema. Estamos frente a un problema de patrones de comportamiento. En ese sentido, su proyecto se distingue del punto de vista de la biología molecular. La organización como punto central de la discusión biológica, desde luego, no es un enfoque novedoso, pero sí lo es la manera en la cual Kauffman lo aborda. La mecánica estadística es la herramienta que le permite identificar los patrones recurrentes de los comportamientos promedio y no los comportamientos individuales, como hace la mecánica clásica. Esta puntualización es importante porque marca la ruta y el marco de referencia que Kauffman ha tomado para desarrollar su proyecto. Él lo expone de la siguiente manera:

“La esperanza aquí es caracterizar diferentes clases de propiedades del sistema que [...] son típicas y genéricas y que no dependen de los detalles [...] La mecánica estadística nos da nuestro más claro ejemplo del uso de los promedios estadísticos, de ahí, propiedades que son típicas y genéricas se toman como descriptores compactos de un sistema complejo” [Kauffman 1995, pp. 17].

Las modelos *NK* desarrollados por Kauffman, también conocidos como redes booleanas, operan en términos de la mecánica estadística. Recordando, las redes booleanas son gobernadas por tres parámetros fundamentales: el número de nodos (N), el número de conexiones por nodo (K), y el número de funciones booleanas (P) que gobiernan los nodos. El estado de cualquier nodo booleano puede ser 1 (encendido) ó 0 (apagado). Los cambios en el sistema dependen de los estados de las entradas de los nodos y la funciones booleanas de activación. Kauffman simula estas redes variando los valores de K , en donde K toma valores desde $K = N$ (cada elemento está conectado a otro elemento) hasta $K = 0$ (en el que ningún elemento regula la actividad de otro); y en donde hay N nodos con 2^N posibles configuraciones, esto es, 2^N estados en el espacio de fases. La estrategia de Kauffman consiste en llevar a cabo un muestreo estadístico de todo el rango posible de redes con valores dados para sus parámetros N , K , y P . Kauffman no pretende explicar el comportamiento de una red de este tipo en particular, lo que pretende es describir el comportamiento estadístico de sistemas con estas tres variables de control características; así, este tipo de mecánica estadística explica las propiedades típicas y genéricas resultantes de las redes *NK* las cuales Kauffman describe como *espontáneas* [Richardson 2001, pp. 672-673]. Habernos detenido en esta explicación es importante porque describe la singularidad del enfoque usado por Kauffman para encarar el problema de la organización en biología, por ello, los problemas y las soluciones que de aquí surgen son distintos, por ejemplo, a los de la biología molecular. Kauffman no se pregunta por la química o bioquímica particular de determinado ensamblaje molecular, ni si algunos enlaces químicos muestran mayor estabilidad que otros bajo ciertas condiciones. Su enfoque no está orientado y no resolvería ningún problema de este tipo, digamos, de carácter composicional o a nivel de detalle. Su descripción es a nivel de patrones globales de comportamiento. A partir de esto resulta claro que los criterios para plantear problemas y evaluar soluciones utilizados en el proyecto Kauffmaniano resultan distintos a los empleados por el paradigma neo-darwinista vigente, por tanto, se puede decir que el trabajo desarrollado por Kauffman se ajusta a la segunda característica definida por Kuhn en torno a la estructura de las revoluciones científicas.

La tercer característica es la correspondiente a un tipo de transformación en la “imaginación” científica; esto es, la manera en la cual se ven, entienden e interpretan los

fenómenos que se encuentran en estudio, mejor descrita como una transformación del mundo dentro del cual el trabajo científico se realiza. Como lo comenta Richardson [2001, pp. 656] “donde los biólogos neo-darwinistas ven adaptación, Kauffman ve orden emergente o espontáneo, surgiendo a partir de la auto-organización. Donde los biólogos neo-darwinistas ven cambios graduales conducidos por la selección natural, Kauffman ve transiciones de fase entre atractores vecinos”. Pero también es cierto que la biología evolutiva utiliza modelos estocásticos como herramienta de trabajo, al igual que Kauffman, lo hace para interpretar sus sofisticados modelos matemáticos que le permiten explicar el comportamiento promedio de los sistemas dinámicos complejos. Planteado así, se puede formular la pregunta: ¿son éstos mundos distintos? Cuando la transición de un paradigma a otro se ha completado, la profesión cambia su visión del campo, sus métodos, y sus metas. Esta reorientación ha sido descrita como el manejo de un mismo conjunto de datos, pero puestos en un nuevo sistema de relaciones con el cual se crea un marco de referencia distinto; algunos lo describen, también, como un cambio de visión o *gestalt*, pero este razonamiento puede llegar a confundir, ya que los científicos no ven un “algo” como algo “más”, sólo ven “algo”; esto es, no ven ahora un pato como un conejo, ven un conejo, y no otra cosa.

El siguiente ejemplo utilizado por Salmon [1989, pp. 183; en Richardson 2001, pp. 657] puede ayudar a aclarar la pregunta inicial. Si un globo cargado con helio se encuentra a bordo de un avión en reposo, ¿qué sucederá con el globo cuando despegue la aeronave? Una persona común y corriente diría que el globo se iría hacia el fondo del avión. Un físico podría predecir lo contrario, que el globo se moverá hacia delante, en la dirección de la cabina del piloto. Y, en efecto, sucede lo segundo. ¿Cuál es la razón? Se puede explicar de dos maneras distintas. Primero, en tanto que el avión comienza a acelerar, la pared trasera del avión crea un gradiente de presión de la parte trasera hacia la parte frontal de la aeronave, ya que hay mayor presión hacia la parte trasera, las moléculas que bombardean esta pared moverán el globo hacia delante (lo mismo sucede al agitar una botella con líquido gaseoso, el corcho saldrá disparado hacia delante). Pero hay una segunda explicación. Un marco de referencia para la aceleración es equivalente a un marco inercial dentro de un campo gravitacional. Estos estados de movimiento son equivalentes. El globo de helio tiende a moverse lejos de la fuente del campo gravitatorio (como cuando se gira

una cubeta con agua, ésta no se derrama por el mismo efecto). Así que el globo se mueve hacia delante, lejos del campo gravitatorio equivalente. De estas dos explicaciones, la primera apela a una descripción causal del efecto que tienen las moléculas sobre el globo (éstas lo empujan), mientras que la segunda se refiere a principios generales, los cuales no descansan sobre mecanismos causales. La primera se podría describir como una explicación causal o mecánico/causal, la segunda, más ampliamente, como estructural. Ambas son correctas, y ambas no suponen dos mundos distintos. Entonces, respondiendo a la pregunta inicial ¿son estos mundos distintos? La respuesta es, definitivamente, no. El proyecto Kauffmaniano plantea, como se explicó en el criterio anterior, nuevos problemas, nuevas soluciones, y nuevas herramientas de análisis que obedecen a cierto nivel o tipo de explicación, pero no vive en un mundo distinto e incompatible al de los biólogos neo-darwinistas. Por otra parte, desde el punto de vista de la doctrina emergentista, tanto el proyecto Kauffmaniano como el paradigma neo-darwinista son compatibles con ésta, lo cual refuerza el argumento de que no se encuentran en mundos distintos.

El proyecto Kauffmaniano, se ha podido apreciar, no se ajusta a los criterios definidos por Kuhn en los puntos 1 y 3 anteriormente descritos con respecto a la estructura de las revoluciones científicas, por lo tanto, respondiendo a la pregunta inicialmente planteada, se puede afirmar que el proyecto Kauffmaniano no puede ser catalogado como una revolución científica de la biología teórica en el sentido Kuhniano. Ahora, si el proyecto de Kauffman no se puede considerar de esta manera, entonces ¿cómo debería ser clasificado?

Se puede explorar otra opción en el trabajo desarrollado por Lakatos sobre los programas de investigación científica. El tema central en el trabajo de Lakatos es el referente al crecimiento o incremento del conocimiento [Hacking 1979, pp. 384]. Para Lakatos, el crecimiento y avance de la ciencia es un proceso continuo expresado por el desarrollo y la competencia de programas de investigación científica los cuales paulatinamente van supliendo unos a otros. Los programas de investigación están formados por un núcleo central inamovible y una periferia de hipótesis alternativas las cuales serán ajustadas, reajustadas e incluso remplazadas, a fin de proteger el núcleo central. El progreso de los programas de investigación se da en tanto que su crecimiento teórico anticipa su crecimiento empírico, esto es, predice nuevos hechos con cierto éxito; se dice que los

programas se estancan si su crecimiento teórico queda rezagado tras el crecimiento empírico, esto es, sólo da explicaciones post-hoc de hechos anticipados o descubiertos en un programa rival [Lakatos 1970a, pp. 100]. Si un programa de investigación explica progresivamente más que uno rival, éste suple al otro, y el rival puede ser eliminado. Ya que el proceso de remplazar un programa de investigación por otro es gradual, puede pasar mucho tiempo antes de que se pueda apreciar que un programa rival explica hechos nuevos [Lakatos 1983]. Lakatos sostenía, por otra parte, que no hay experimentos cruciales tales que inmediatamente sean capaces de derrumbar un programa rival; además, si un experimento es crucial o no, o si una hipótesis es altamente probable a la luz de la evidencia disponible o no, no depende en lo más mínimo de las creencias de los científicos, de su personalidad o autoridad. Estos factores subjetivos no son de interés para ninguna historia interna [Lakatos 1970a, pp. 106]. Para Lakatos el cambio científico, en resumen, es racional.

Retomando otra vez el proyecto Kauffmaniano, lo que se desea establecer es en qué sentido llega a ser éste revolucionario, renovador, o radical. El trabajo desarrollado por Lakatos nos ayuda a entender y plantear el proyecto Kauffmaniano como un programa que tiene sus raíces en la doctrina emergentista, la biología del desarrollo, y la biología evolutiva (las cuales fueron desarrolladas durante el siglo XIX); su proyecto no es una irrupción inesperada acontecida hacia finales del siglo XX que tomó completamente por sorpresa al mundo científico, fue más bien un proceso gradual de avances el que permitió a Kauffman proponer y desarrollar determinados planteamientos en torno al problema del orden biológico. Por otra parte, dado que la metodología de Lakatos principalmente se enfoca a explicar de que manera el conocimiento se incrementa (de manera acumulativa y gradual), y, además, ofrece un criterio de demarcación entre ciencia madura (consistente de programas de investigación) y ciencia inmadura (consistente de ensayos de prueba y error), o lo que es lo mismo un criterio objetivo de demarcación entre lo que es ciencia (conocimiento racional) y lo que no lo es (conocimiento irracional), poco puede ayudar para responder la pregunta sobre por qué el proyecto Kauffmaniano podría considerarse revolucionario; además, el enfoque de los programas de investigación tiene, al menos, dos limitaciones importantes para nuestro caso particular. Primero, su metodología sólo se aplica a “programas completamente articulados” [Lakatos 1970b, pp.174] (aunque puede

llegar a ser problemático determinar qué es un programa completamente articulado). Partiendo de este supuesto, el proyecto de Kauffman, como él mismo lo afirma, es apenas el bosquejo de un ambicioso y prometedor programa de investigación, por lo tanto, esta condición lo excluiría de tal análisis. En segundo lugar, como ya se había advertido, ya que el proceso de remplazar un programa de investigación por otro es gradual, puede pasar mucho tiempo antes de que se pueda apreciar que un programa rival explica hechos nuevos. Como lo apreciaron Kuhn y Feyerabend [Lakatos 1970b, pp. 175], la metodología propuesta por Lakatos no es de aplicación inmediata, no ayuda, inmediatamente, a distinguir entre un programa progresivo y uno que degenera. Bajo esta óptica es difícil evaluar el proyecto Kauffmaniano, a la luz de los trabajos de Lakatos, de otra manera que no sea el apreciarlo como un proyecto que tiene sus raíces (mas no su desarrollo) en la biología del siglo XIX y que no hizo su aparición abruptamente, como podría pensarse, en la biología teórica hacia finales del siglo XX. Pero esta perspectiva Lakatosiana no es suficiente para explicar el carácter revolucionario –si es que existe- del proyecto Kauffmaniano. De tal suerte que vamos a explorar una última alternativa a este respecto.

Esta tercer propuesta gira en torno a la noción de “estilo” propuesta en un inicio por A. C. Crombie, pero desarrollada por Hacking (1992) y nombrada por él como “estilos de razonamiento científico”. De acuerdo con esta explicación, y siguiendo un ejemplo clave propuesto por Hacking, el creciente interés en las técnicas estadísticas que transformaron la ciencia y la sociedad Europea en el siglo XIX debería ser entendido como el resultado del éxito de un nuevo estilo de razonamiento científico –un patrón de éxito el cual probó ser revolucionario sin ser reducible a ningún tipo de revolución científica Kuhniana [Hacking 1987; en Kellert 1992, pp. 45]. Trabajar dentro de un estilo de razonamiento científico no supone la creencia en ciertas proposiciones al modo Lakatosiano (el núcleo central de un programa), sino más bien implica *la práctica de determinadas maneras de razonar en torno a ciertas proposiciones*. El término “estilo” involucra la práctica, el razonamiento, y la formulación de proposiciones [Kellert 1992, pp. 45]. Dos condiciones son necesarias para que una teoría se califique como un nuevo estilo de razonamiento científico, por una parte, debe introducir nuevos tipos de objetos, evidencias, leyes o principios, y proposiciones; y, por otra, el estilo de razonamiento debe ser autónomo. Hacking utiliza el término “autonomía” para referirse a dos elementos diferentes de un nuevo estilo de

razonamiento. En un sentido restringido, una nueva técnica, al generar y probar proposiciones, es autónoma si puede ser utilizada para explicar algo más (cómo en el caso de la probabilidad y la estadística) [Hacking 1987, pp.53; en Kellert 1992, pp. 46]. Por ejemplo, el razonamiento *dinamista* afirma su autonomía buscando explicar los comportamientos en términos que sean distintos a los mecanismos causales subyacentes, esta forma de razonar es aplicable a muchos otros campos de estudio, distintos a aquel del cual tuvo su origen tal estilo de razonamiento. En un sentido más amplio, Hacking requiere que un estilo de razonamiento pruebe su autonomía de la micro-historia de su nacimiento. Debe persistir, crecer y echar raíces en un contexto institucional más allá de las circunstancias de su origen.

Para responder la pregunta: ¿representa el proyecto Kauffmaniano un nuevo estilo de razonamiento científico?, es necesario analizar el cumplimiento de las condiciones propuestas para tal posibilidad. En primer lugar, el proyecto Kauffmaniano introduce en la biología teórica objetos (matemáticos) como los atractores (extraños, de ciclo límite, de punto fijo, etc.). Los atractores permiten describir los patrones de comportamiento de los sistemas dinámicos; entendido así, la dinámica mostrada por las redes genómicas, o por las redes metabólicas, puede ser descrita con esta herramienta. Nuevos tipos de análisis, distintos a los de la biología molecular, pueden llevarse a cabo con estas herramientas, complementando los métodos ya existentes. Por otra parte, el proyecto de Kauffman introduce lo que él llama leyes o principios de la complejidad o auto-organización, que pretenden explicar los procesos de organización en sistemas complejos tan diversos como pueden ser los físicos, biológicos, ecológicos, sociales, o económicos; esta es una parte central de su proyecto. En referencia a las evidencias disponibles sobre la aplicabilidad y utilidad de tales principios, modelos e hipótesis generadas, ellas pueden ser encontradas en cada uno de estos campos: en física: Per Bak (1991), Prigogine (1977); en biología: Kauffman (1993, 1995), Packard y Bedau (2003), Lee *et al.* (1996, 1997), Yao *et al.* (1998); en ecología: Sole *et al.*(1999); en las organizaciones sociales: Smith y Stevens (1996), en economía: Leydesdorff (2002), McKelvey (1999). De igual manera, Kauffman ha desarrollado, también, proposiciones o hipótesis de vital trascendencia tales como: “El surgimiento de nuevas propiedades emergentes ocurre en una región o transición de fase llamada el límite del caos”; “La auto-organización es una precondition para la capacidad de

evolucionar”, “La evolución ocurre en el límite del caos”. Tales proposiciones han trascendido el ámbito de los problemas biológicos.

En general, Kauffman ha desarrollado modelos (sus redes booleanas) que permiten explicar una gran diversidad de fenómenos relacionados con la organización de sistemas complejos no limitados a la biología. Los modelos de Kauffman se han aplicado para encarar, entre otros, problemas tecnológicos, económicos, y ecológicos. Los modelos, principios y proposiciones desarrolladas en el proyecto Kauffmaniano han sido utilizadas más allá de su campo, sin importar que hayan sido desarrolladas para el estudio de la dinámica genética. En este sentido, cumple, también, la condición de autonomía descrita por Hacking. *El estilo de razonamiento científico al que conduce el proyecto Kauffmaniano es a describir los patrones de comportamiento de los sistemas complejos, estudiando la interacción entre procesos que operan en diversas escalas de tiempo, espacio y complejidad organizacional. La clave para tal estudio es entender la relación entre los procesos microscópicos y los patrones macroscópicos [Levin 2002, pp. 3].*

Si el proyecto Kauffmaniano no implica una revolución científica en el sentido Kuhniano del término, ni tampoco es, por completo, un programa de investigación progresivo del tipo propuesto por Lakatos, sí ofrece a la biología teórica (y no sólo a ella) un nuevo estilo de razonamiento científico como el descrito por Ian Hacking, posiblemente tan revolucionario como lo fueron las técnicas estadísticas que transformaron la ciencia y la sociedad Europea en el siglo XIX.

3.5 Entre ciencia y filosofía: la relación entre la ciencia física y la ciencia biológica.

En el apartado anterior se planteó lo siguiente: *el proyecto Kauffmaniano es de suma importancia no porque se radicalice en contra de una teoría evolucionista basada sobre las teorías de la selección natural y la herencia, llamado también el paradigma neo-darwinista, sino porque pretende establecer una nueva síntesis, esto es, integrar en un mismo marco explicativo la biología del desarrollo y la biología evolutiva, y esto sobre la base de una forma distinta de abordar, razonar y desarrollar el problema del orden*

biológico, es decir, un nuevo estilo de razonamiento científico. El estilo de razonamiento científico al que conduce el proyecto Kauffmaniano es a describir los patrones de comportamiento de los sistemas complejos, estudiando la interacción entre procesos que operan en diversas escalas de tiempo, espacio y complejidad organizacional. La clave para tal estudio es entender la relación entre los procesos microscópicos y los patrones macroscópicos.

El presente apartado describirá en qué consiste tal síntesis y analizará las implicaciones que tienen como referencia el problema del reduccionismo/antirreduccionismo en biología y la relación entre la ciencia física y la biológica.

En términos generales, la biología evolutiva es una ciencia histórica; su tema central es la expansión en el tiempo y en el espacio de un proceso único, el crecimiento del árbol de la vida. En contraste, la biología del desarrollo⁴⁰ estudia un fenómeno que re-ocurre regularmente en la naturaleza [Sterelny 2000, pp. 369-370]. En general, el desarrollo se refiere esencialmente al establecimiento y diferenciación de estructuras celulares y anatómicas [Laubichler y Wagner 2001, pp.58]. El problema del desarrollo es básicamente el de la diferenciación espacial y el crecimiento. A la creciente diversidad de *células tipo* se le llama diferenciación celular, y a su coordinación dentro de tejidos organizados y órganos se le llama morfogénesis. Así, las preguntas fundamentales de la biología del desarrollo, siguiendo a Laubichler y Wagner [2001, pp.57-58], son: 1) ¿a través de qué rutas una célula aparentemente bastante homogénea se desarrolla en un organismo completamente diferenciado?, 2) ¿cuáles son los mecanismos que guían este despliegue en tres dimensiones?, 3) ¿cuáles son los objetos biológicos relevantes que están causalmente involucrados en estos procesos de desarrollo?, y 4) ¿cuál es la relación entre información genética y la complejidad fenotípica, que es el producto final del proceso de desarrollo?

⁴⁰ De acuerdo a Sterelny [2000, pp. S369]: “la relación entre la biología del desarrollo y la biología evolutiva ha sido cambiante e incierta. En la segunda mitad del siglo XIX, la relación fue muy íntima. La biología evolutiva estuvo dominada por metáforas desarrollistas (Bowler 1988). Las concepciones ortogenéticas sobre las trayectorias evolutivas dominaron las Darwinistas. Por el contrario, el programa de la biología del desarrollo se enfocó a reconstruir la filogenia a través de principios recapitulacionistas. De cualquier forma, al comienzo del siglo XX, la biología del desarrollo sustituyó una agenda mecanicista por una filogenética y las dos disciplinas biológicas tomaron caminos separados. Una vez que la biología del desarrollo hubo adquirido su nuevo programa, los dos campos tuvieron muy diferentes puntos de referencia”. Cf. Sterelny, K.: “Development, Evolution, and Adaptation”, *Philosophy of Science*, 67, 2000, pp. S369-S387

Kauffman sostiene que el dogma central de la biología (molecular) del desarrollo es el siguiente: “las células difieren porque diferentes genes están activos en las diferentes células tipo del organismo. Así, [por ejemplo], las células de la sangre expresan el gen que codifica la hemoglobina” [Kauffman 1995, pp. 95]. Jacob y Monod demostraron que los genes podían activarse o inhibirse unos a otros, y que tales circuitos genéticos podían tener patrones alternativos para la activación de los genes que constituyen las distintas células tipo de un organismo. La pregunta central de Kauffman es: ¿cuál es la estructura de tales redes genómicas?, ¿cuáles son las reglas que gobiernan el comportamiento de los genes y sus productos acoplados en las redes de control que gobiernan la ontogénesis? [Kauffman 1995, pp. 99]. Kauffman ha llegado a la conclusión preliminar de que estas redes bajo ciertas condiciones (las ya descritas en apartados anteriores) muestran comportamientos estadísticamente esperados: “en ausencia de la selección [natural] el sistema caerá en propiedades promedio bien definidas” [Kauffman 1982, pp. 309]. Sus modelos (redes booleanas) son capaces de mostrar esta característica: “los patrones de inferencia buscan explicar propiedades biológicas localizándolas como elementos genéricos de un ensamblaje apropiado a través del cual la evolución se mueve” [Kauffman 1982, pp. 310]. Esta postura no elimina una explicación evolucionista, Kauffman lo describe así:

“[...] el punto de vista tomado aquí no contradice los temas centrales de la tradición Darwinista-Mendeliana. No argumenta que la selección y las modificaciones no son importantes para la evolución. Más bien, regresa a una suposición más antigua, la de que hay principios subyacentes de orden explotados en la evolución de los seres vivientes. [Kauffman 1982, pp. 312]

Estas propiedades típicas de las redes genómicas son posibles gracias a los procesos de auto-organización del sistema. La auto-organización del sistema ocurre en una región cercana al límite del caos, en tal región es donde las correlaciones, y por tanto las variaciones heredables, indispensables para la evolución, son posibles. La capacidad para evolucionar se maximiza en el borde del caos, y es la selección natural la que alcanza y sostiene este estado posicionado en el límite del caos. La selección natural maximiza las variaciones heredables. La adaptación es el proceso por el cual se maximiza la capacidad para evolucionar (*evolvability o adaptabilidad*), entendida ésta como la cantidad de variación heredable [Richardson 2001, pp. 678-679]. Dicha adaptabilidad sólo se logra a partir de estructuras auto-organizadas sobre las cuales operan tanto la selección natural

como las variaciones heredables, esto es lo que sostiene la síntesis Kauffmaniana. En resumen: Kauffman asume que existen propiedades estadísticamente comunes de organización en las redes genómicas o estructuras metabólicas, independientes de la selección natural, que sirven de soporte para que opere la selección natural.

¿Qué implicaciones tiene esta síntesis (entre los principios de organización y los accidentes históricos de la evolución) en referencia al problema del reduccionismo/antirreduccionismo en biología y la relación entre las ciencias física y biológica? El reduccionismo, propone Rosenberg [2001, pp. 135], “es una tesis metafísica, una postura acerca de las *explicaciones*, y un programa de investigación” [énfasis añadido]. La tesis metafísica reduccionista –agrega Rosenberg– “sostiene (y los antirreduccionistas aceptan) que todos los hechos, incluyendo los hechos biológicos, están determinados por hechos físicos y químicos; no hay eventos, estados, o procesos no-físicos, así, los eventos biológicos, los estados y procesos no son sino de tipo físico. El programa de investigación puede ser caracterizado como una prescripción metodológica que procede a partir de una postura acerca de las explicaciones. Los antirreduccionistas no disputan la afirmación reduccionista metafísica, pero rechazan la afirmación explicativa y, así, la metodológica” [Rosenberg 2001, pp. 135]. No obstante, Rosenberg ha afirmado recientemente que “el antirreduccionismo interpreta la actual división de la biología no simplemente como un elemento temporal de nuestra ciencia que surge a partir de nuestras imperfecciones cognitivas sino como el reflejo de los niveles de organización en la naturaleza. Es esta tesis metafísica –la de que hay hechos, clases, y generalizaciones las cuales están fuera del alcance de la biología molecular- la que está en disputa entre el reduccionismo y el antirreduccionismo” [Rosenberg, por aparecer].

La tesis sobre el monismo físico es aceptada por la corriente reduccionista, así como también por la antirreduccionista: todas las entidades, hechos, estructuras, procesos, y estados biológicos están constituidos por partes físicas. Es la tesis fuerte acerca de las capacidades causales de las propiedades biológicas sobre la que ambas corrientes se distinguen. La corriente reduccionista afirma que las capacidades causales de las propiedades biológicas están determinadas por las capacidades causales de las propiedades físicas y químicas de sus elementos constituyentes. La corriente antirreduccionista afirma

que las capacidades causales de las propiedades biológicas no están completamente determinadas por las capacidades causales de las propiedades físicas y químicas de sus elementos constituyentes. El programa reduccionista en biología sostiene que toda biología es reducible, en primer término, a la biología molecular, y en última instancia, a la física. Desde este punto de vista, la biología es un campo temporal de estudio que, eventualmente, será remplazado por la física. El programa antirreduccionista en biología sostiene, por el contrario, que no todos los fenómenos biológicos son reducibles al campo de la biología molecular y, por tanto, al de la física. En este sentido, la biología fija su autonomía con respecto al campo de la física. Rosenberg propone dos principios que han sido sostenidos para argumentar la autonomía de la biología no molecular con respecto de la biología molecular:

“(1) el principio de la realidad autónoma: Los niveles, unidades, y las clases identificadas en biología funcional⁴¹ son reales e irreducibles porque ellas reflejan la existencia de generalizaciones explicativas objetivas que son autónomas de aquellas de la biología molecular.

(2) El principio de primacía explicativa: Al menos en ocasiones los procesos en el nivel funcional proveen la mejor explicación para los procesos en el nivel molecular”. [Rosenberg 1997, pp. 446].

Para Rosenberg, “estos dos principios suponen un compromiso con la causalidad descendente” [Rosenberg 1997, pp. 464], en otras palabras, “las clases biológicas deben tener propiedades emergentes, y debido a estas propiedades emergentes, deben seguir su propio conjunto de principios causales que no pueden encontrarse en el nivel de sus componentes moleculares” [Laubichler y Wagner 2001, pp.54].

Retomando el carácter emergentista y el análisis acerca de la causalidad descendente en el proyecto Kauffmaniano, lo que se planteó en un anterior apartado fue su compatibilidad con una *causalidad descendente débil*, la cual puede ser interpretada a la luz de dos tesis: el reduccionismo constitutivo, y el irreduccionismo constitutivo (consultar el apartado referente al alcance ontológico del proyecto). En tanto que no se rechaza el reduccionismo

⁴¹ Para Rosenberg la biología no molecular es biología funcional, “funcional porque identifica las estructuras biológicas y los sistemas por sus roles causales, regularmente sus efectos adaptativamente seleccionados”. [Rosenberg 1997, pp. 446]. “La biología funcional es el estudio de los fenómenos bajo su tipo de descripción funcional –por ejemplo, organismos, órganos, tejidos, células [...]. [Rosenberg 2001, pp. 135].

constitutivo, dicha postura es asimilable al micro-determinismo característico del emergentismo epistemológico porque, al ser considerado el macro-nivel (por ejemplo, una célula) no como una sustancia sino simplemente como un tipo de organización, concede que la propiedad del macro-nivel (de organización) está determinada completamente por los elementos constituyentes de la micro-estructura, por tanto, al no haber propiedades causales exclusivas del macro-nivel, no se puede sostener una explicación macro-determinista para el emergentismo, y, por tanto, no se puede sustentar la tesis de la irreducibilidad. Al no cumplir estrictamente con la tesis de la irreducibilidad, el proyecto Kauffmaniano no soporta las versiones fuertes del emergentismo ontológico. En este sentido, el trabajo de Kauffman no implica un cambio en el estado de la disputa sostenida entre la corriente reduccionista y la antirreduccionista en torno al problema ontológico sobre las capacidades causales de las propiedades biológicas, esto es, no favorece a ninguna de las dos corrientes. Esto se puede explicar porque Kauffman no busca relaciones causales de ningún tipo, sino patrones de comportamiento estadísticamente comunes en las redes genómicas y metabólicas.

Rosenberg [por aparecer] sostiene que una defensa epistémica del debate entre la corriente reduccionista y antirreduccionista encuentra su solución –débil e insatisfactoria para ambas corrientes- al asumir que muchas explicaciones simplemente reflejan limitaciones temporales o antropocéntricas acerca de la indagación biológica. Kauffman no atribuye tales explicaciones a limitaciones en términos del conocimiento humano, sino a que, simple y sencillamente, tales explicaciones reduccionistas no son en todos los casos *útiles*:

“No hay necesidad de una descomposición última tal que todas las demás descomposiciones sean deducibles a partir de ésta, aunque puede haber tal descomposición “última”. Kauffman [1970, pp. 259]. [Énfasis añadido]

En un sistema auto-catalítico, no tiene ningún sentido hablar de las propiedades individuales de las moléculas, o de alguna en particular, porque son las relaciones y el comportamiento del sistema entero los que explican la transición de fase que hace posible la auto-sustentación y auto-replicación de una estructura metabólica. De igual manera, la forma y desarrollo de un ser vivo no se explica por completo en términos de la acción de un gen o morfogen, como lo expresa la biología molecular del desarrollo, ya que su actividad

está condicionada por la interacción de todos los genes que forman la red genómica, y por los principios que permiten tal interacción (las reglas de activación en las redes genómicas). Lo que muestra el proyecto Kauffmaniano es que el principio biológico de selección natural actúa sobre la organización espacial de ensamblajes genéticos regidos por principios auto-organizativos, la auto-organización es solamente una parte de la explicación; por lo tanto, una explicación sobre el origen y evolución de la vida que prescindiera de la selección natural y las variaciones heredables es incompleta, pues resulta evidente que no todos los sistemas físicos complejos que experimentan procesos de auto-organización son capaces de auto-mantenerse, auto-replicarse, reproducirse, y evolucionar. En este caso, una estrategia o metodología reduccionista no es de *utilidad* para *explicar* las condiciones en las cuales se generan los patrones de comportamiento que permiten la existencia de redes genómicas correlacionadas (estructuras en las cuales un estado inicial y un estado posterior modificado están relacionados, permitiendo con esto la existencia de variaciones heredables). El antirreduccionismo epistémico sostenido en el proyecto Kauffmaniano *es compatible con el principio de primacía explicativa* ya que los procesos en el nivel funcional proveen la mejor explicación para los procesos en el nivel molecular, o expresado de otro modo, la dinámica de los comportamientos globales de los elementos del sistema provee una mejor explicación que aquella que deriva del conocimiento individual de los constituyentes elementales; sus modelos sobre conjuntos auto-catalíticos y redes genómicas son un claro ejemplo de ello. En este sentido, se puede afirmar que existe una *limitación explicativa* en la estrategia o metodología reduccionista para dar cuenta de todos los procesos y estructuras biológicas en términos exclusivamente de una biología molecular. Esta limitación no se debe a posibles restricciones cognitivas del investigador, o a la falta de conocimiento acerca de las propiedades de los constituyentes de un sistema, como tradicionalmente se argumenta, se debe más bien a la *utilidad* de la explicación con respecto al problema y las preguntas planteadas por los investigadores; en el caso particular de Kauffman: el orden biológico y su emergencia.

Regularmente, la distinción epistémica entre el reduccionismo y antirreduccionismo en biología se hace sobre la base de su autonomía explicativa [Rosenberg por aparecer, 2001]. El término *autonomía* es confuso, pues supone que, entre otras cosas, las herramientas y métodos de análisis (cuantitativos y cualitativos) utilizados por la biología molecular y la

no-molecular son excluyentes, lo cual no necesariamente se cumple. Para evitar tal confusión, se ha utilizado el término *límite explicativo*, el cual se ajusta más al enfoque Kauffmaniano, pues elimina la idea de que existen campos autónomos insalvablemente inconexos (la biología molecular y la no-molecular), y resalta el papel que tiene la práctica científica, que involucra el planteamiento de problemas, preguntas, y el desarrollo de estrategias de investigación, para determinar los límites explicativos o la utilidad explicativa. Un ejemplo claro sobre la conexión entre las explicaciones en biología molecular y no-molecular se encuentra en los trabajos desarrollados por Jacob y Monod (en la biología molecular) acerca de la influencia que ejercen los genes para provocar su misma actividad o inactividad en una red genómica, y los de Kauffman, quien pretende describir los principios de organización que gobiernan tales redes. Sin este avance logrado por Monod, y su respectiva estrategia de investigación (reduccionista), los trabajos de Kauffman (antirreduccionistas) sobre el comportamiento de las redes genómicas y el orden emergente habrían sido imposibles. En resumen, el reduccionismo y antirreduccionismo en biología, en tanto que son metodologías para proveer explicaciones [Rosenberg 2001, pp. 160], serán de mayor o menor utilidad para tal propósito en función de un problema, una serie de preguntas, y una práctica investigadora concreta. Este pragmatismo explicativo establece una relación entre las preguntas y respuestas ofrecidas en el contexto de las creencias de un investigador. Estas creencias reflejan las presuposiciones de los investigadores, los cuales, en conjunto, determinan la calidad y el valor explicativo de diversas respuestas [Rosenberg 1997, pp. 466]. Esta postura es claramente expuesta por Laubichler y Wagner:

“Los organismos son “todos” organizados que no tienen “partes” definidas *a priori*. Cualquier identificación de partes causalmente relevantes (tales como las células o las moléculas) es una decisión informada por parte de los investigadores que idealmente refleja una selección de objetos que es dependiente del contexto de los procesos biológicos mismos. De aquí, tenemos que justificar en cada ejemplo si un objeto particular, tal como una molécula específica o un gen, realmente desempeña un rol útil dentro de una explicación mecanicista. En muchos ejemplos, las moléculas son las entidades relevantes, por ejemplo, en la explicación de los metabolismos celulares, pero asumir *a priori* que ellos siempre tienen que ser los niveles relevantes de descripción es adoptar una posición metafísica contraria a la propia conducta científica [...]”. [Laubichler y Wagner 2001, pp. 60]. [Énfasis añadido].

¿Qué implicación tiene este antirreduccionismo epistémico del proyecto Kauffmaniano sobre la relación entre la ciencia física y la ciencia biológica? Para sostener una autonomía real entre ambos campos se debe cumplir el principio de *realidad autónoma*. Como se ha expuesto anteriormente, el alcance ontológico del proyecto Kauffmaniano, aunque permanece como una posibilidad latente al ajustarse éste a una noción de causalidad descendente débil, finalmente resulta cuestionable, y, por lo tanto, no satisface contundentemente el principio de realidad autónoma. Ya que el proyecto Kauffmaniano no aporta elementos definitivos para argumentar una autonomía fundamental entre ambas ciencias, ¿aporta alguna contribución al debate sobre la dependencia entre la ciencia física y la ciencia biológica?

El primer acercamiento profundo que se produjo entre la física y la biología en el siglo pasado fue tendente a “fiscalisar” la biología. Durante ese periodo, volver física a la biología se entendió, en forma general, de dos maneras distintas. Por un lado, se encontraban los que entendieron que volver física a la biología era explicarla en términos puramente materiales; estos fueron los emergentistas. Por el otro lado, se encontraban los que entendieron que volver física a la biología era precisamente eso, convertir la ciencia biológica gradualmente en una ciencia física, o mejor dicho, en una tradición muy específica de hacer ciencia física; estos fueron los biólogos moleculares (en gran parte físicos convertidos a la biología). La reacción a esta problemática en la filosofía de la biología ha sido la de delimitar el ámbito de competencia de ambas ciencias, justificar una autonomía. Una nueva corriente de físicos y biólogos, entre quienes se encuentra Kauffman, durante el último cuarto del siglo pasado han seguido otra ruta de investigación en la cual importa menos la existencia de una división real entre la ciencia física y la ciencia biológica, esto es: para ellos existen otros problemas dentro de los cuales el programa reduccionista de la ciencia física, retomado por los biólogos moleculares, no logra desarrollar explicaciones convincentes. Este tipo de problemas son comunes para ambas ciencias: la organización de los sistemas complejos y de los sistemas adaptativos complejos.

En un plano muy general, la síntesis que ha bosquejado Kauffman entre la biología del desarrollo y la teoría evolucionista neo-darwinista, pretende relacionar dos principios fundamentales: el de la auto-organización de los sistemas físicos y el de la selección natural de los sistemas biológicos. Esta posición lejos de dividir los campos de la física y de la biología, o de pretender reducir la biología a la física o a la química, conjunta ambos campos para poder explicar el orden y el desarrollo de los seres vivos. En este sentido, el nuevo estilo de razonamiento científico que distingue al proyecto Kauffmaniano, por un lado, ayuda, en el ámbito de la práctica científica, a poner menos énfasis en las divisiones disciplinares. Y esto es fácil de explicar ya que su proyecto no está enfocado en el estudio de las particularidades físicas, químicas, o biológicas de los sistemas, sino en los patrones globales de relación y organización. En este caso, para el estudio de la forma y la función de los seres vivos (o sistemas adaptativos complejos) es indispensable mantener una estrecha relación explicativa entre la física y la biología, y no una bien delineada autonomía. Por otro lado, en el ámbito de la práctica filosófica a lo que el proyecto Kauffmaniano ayuda (en torno al problema entre el reduccionismo y el antirreduccionismo en biología y la relación entre la ciencia física y la biológica) es a reafirmar la importancia que tiene la práctica de la investigación científica para determinar la utilidad de cualquiera de las dos metodologías explicativas. También nos habla de la relación entre ambos campos de conocimiento, y nos explica que su estrecho nexo o autonomía es un hecho que solamente puede ser apreciado *a posteriori*.

Para concluir, es necesario hacer notar que existen toda una serie de cuestiones en torno al proyecto Kauffmaniano que aún no han sido respondidas. Tal hecho no resta méritos a su gran empresa científica; al contrario, la distingue por dejar un campo sembrado de preguntas que obligan a la indagación futura. A continuación, se enunciarán algunas de ellas.

1. Si, como Kauffman argumenta, en un principio la vida surgió como un metabolismo carente de un sistema genético primitivo, ¿por qué razón, eventualmente, surgió un sistema genético?
2. En este mismo sentido, si la selección natural opera al nivel de las redes genómicas, maximizando las variaciones heredables, entonces ¿qué factor discriminó

(seleccionó) entre un metabolismo con un sistema genético primitivo y uno carente de él? ¿Fue un accidente?

3. ¿Cómo se puede reconciliar una ciencia histórica repleta de accidentes y de variaciones al azar con una de leyes o principios de organización?
4. ¿Qué validez puede llegar a tener una teoría que simplemente no toma en cuenta las particularidades de los elementos que constituyen el campo y los objetos de estudio?
5. ¿En qué medida la selección afecta los patrones generales de la evolución, el morfoespacio?, ¿en qué medida son los patrones ontogénicos el resultado de la selección?
6. ¿Completa la biología del desarrollo su programa de investigación al integrar en su campo las teorías de la auto-organización?, ¿una teoría general de la biología puede ser alcanzada al integrar en un mismo marco explicativo los principios de la auto-organización y la selección natural?
7. ¿Pueden los atractores (extraños, de ciclo estable, de punto fijo, etc.) considerarse como objetos ontológicamente reconocibles?
8. ¿Es aceptable una solución pragmática al problema entre el reduccionismo y el antirreduccionismo en biología?
9. ¿Es factible el desarrollo de células sintéticas en el laboratorio?
10. ¿Son válidos sus modelos para explicar los procesos de organización en sistemas tan distintos y diversos como lo son los ecológicos, los económicos, los tecnológicos, o los sociales?

Conclusiones: un nuevo horizonte para el estudio de la Biología: la complejidad y la auto-organización en el Siglo XXI

Las ya conocidas y populares teorías de la complejidad y el caos han logrado, a partir de la segunda mitad del siglo XX, replantear en diferentes campos del conocimiento problemas que han sido por muchos años foco de atención para la ciencia y la filosofía. Algunos entusiastas seguidores de esta corriente son optimistas en el sentido de afirmar que los nuevos desarrollos conceptuales provenientes de estas teorías ayudarán a la comprensión de problemas fundamentales como lo son los del origen y la evolución de la vida. La presente investigación analizó el proyecto que Stuart Kauffman, como uno de los más reconocidos representantes del movimiento en torno al estudio de la complejidad, ha desarrollado para reorientar la postura evolucionista más tradicional (neo-darwinista), sobre el problema del orden biológico. Los objetivos principales de la presente investigación fueron: (1) definir en qué consiste el proyecto Kauffmaniano; (2) determinar su radicalidad y explicar cómo debe ser interpretada; y (3), sobre dicha base, distinguir y analizar las implicaciones que para la ciencia y la filosofía tiene dicho proyecto con respecto al problema de la reducción teórica en biología, así como para la relación existente entre las ciencias físicas y las ciencias biológicas.

Definidos los objetivos de la presente investigación y el camino seguido para cumplir con ellos, el último paso a dar es exponer las conclusiones que la presente investigación arroja, atendiendo para ello al orden claramente establecido por los objetivos generales.

Ante todo, el proyecto Kauffmaniano hay que entenderlo como un punto de partida, y no como uno de llegada. Para Kauffman, el tema central de su proyecto es: el orden biológico, y, a partir de éste, plantea cuestionamientos, por una parte, concernientes al orden observado en la formación, desarrollo y diversificación de los seres vivos, y, por otra, referentes al orden en la creación de las primeras formas de vida. En general, su proyecto se resume en las siguientes ideas centrales: 1) identifica el tema del orden biológico como problema central y punto de partida de su investigación; 2) pretende construir una teoría emergentista que dé cuenta del problema del orden biológico; 3) espera descubrir leyes generales del orden emergente; 4) utiliza las ciencias de la complejidad como fundamento

para plantear tales leyes; 5) explora la relación existente entre auto-organización y selección natural; y 6) sostiene que existen leyes fundamentales y complejas del orden emergente que rigen desde los fenómenos que dieron lugar al surgimiento de la vida hasta la regulación de la biosfera y la econosfera.

Kauffman entiende que el dogma neo-darwinista vigente es incompleto, ya que la selección natural y las variaciones heredables al azar no son suficientes para explicar el orden existente en la naturaleza. Margullis [2000, pp. 124] ha sintetizado este dogma con toda claridad: “los neo-darwinistas dicen que la variación tiene su origen en la mutación aleatoria; definiendo la mutación como cualquier cambio genético. Por aleatoriedad entienden que los caracteres aparecen en la descendencia al azar con respecto a la selección: si una especie animal necesita una cola, no la desarrolla porque la necesita, sino que más bien se produce toda suerte de cambios al azar y los individuos provistos de cola sobreviven para producir más descendencia. Las variantes hereditarias surgen espontáneamente, sin que esto tenga nada que ver con que sean buenas o malas para el organismo en cuestión. La mutación es la fuente de variación sobre la cual actúa la selección natural”. Esta solución, desde la perspectiva de Kauffman, es inaceptable por dos razones: primero, porque el tiempo requerido para que, por simple azar, un sistema viviente llegue a ensamblarse y posteriormente a desarrollar adaptaciones útiles (en ocasiones repetitivas, por ejemplo, ojos, extremidades, etc.) para su supervivencia y reproducción, es inimaginable; lo cual vuelve a la *vida* y a su evolución un hecho muy improbable; y segundo, porque el principio gradualista sobre el cual descansa la teoría de la evolución darwinista, esto es, la idea de que ciertas alteraciones (mutaciones) en el genoma o genotipo causan variaciones menores en las propiedades del organismo (fenotipo), logrando con ello una acumulación paulatina de variaciones útiles, no se sostiene. Y no se puede sostener porque, por una parte, pequeños cambios pueden provocar errores catastróficos en el comportamiento del sistema y, por otra, porque aun suponiendo que mutaciones menores puedan causar cambios menores en el fenotipo, esto no significa que la selección pueda, con éxito, acumular pequeñas mejoras. En lugar de ello, lo que puede ocurrir es que una población en adaptación acumule en lugar de una serie de pequeñas mejoras una serie de pequeños errores (un “error catástrofe”).

Ya que el neo-darwinismo tradicional no logra explicar convincentemente el orden biológico encontrado en la naturaleza, otro recurso debe ser contemplado: la auto-organización. La auto-organización se puede entender como el proceso en el cual las interacciones locales entre los elementos de un sistema producen patrones emergentes de comportamiento sin que para ello sea necesario algún tipo de coerción o control externo. Estos patrones o comportamientos surgen en ausencia de un diseño o plan central y se consideran emergentes porque no pueden ser deducidos a partir del conocimiento total de los elementos de menor nivel. La auto-organización es un fenómeno que ocurre en la transición de fase entre un estado estable y uno caótico, es un fenómeno que se da en la región de estado conocida como el límite del caos. En esta región es donde se coordina el comportamiento complejo que llegará a producir propiedades emergentes como la vida, la evolución misma y la creación de nuevas especies.

Kauffman, en primer lugar, utiliza el principio de auto-organización para ofrecer una explicación alternativa sobre el surgimiento de la vida, en la cual un conjunto de elementos orgánicos primitivos, lo suficientemente diversos, numerosos, e interrelacionados, debido a una dinámica compleja, alcanza su propia catalización, logrando, en ausencia de un sistema genético primitivo, auto-mantenerse y auto-replicarse. Le llamó a este proceso auto-catálisis. La auto-catálisis se lleva a cabo cuando el comportamiento de un sistema se encuentra en la región conocida como el *limite del caos*, una transición de fase que llegará a producir propiedades emergentes. Diversos trabajos de experimentación, como los llevados a cabo por Lee *et al.* (1996, 1997) y Yao *et al.* (1998), han confirmado la posibilidad real de la auto-catálisis. La primera gran aportación de Kauffman es sostener que la *vida* es una propiedad emergente que surge cuando la diversidad molecular de un sistema químico prebiótico va más allá de cierto umbral de complejidad. En este sentido, la *vida* no está localizada en las propiedades de ninguna molécula individual (el ADN), sino que es una propiedad colectiva del sistema de interacción de las moléculas. La vida, así, surgió completa, y siempre ha permanecido completa. La vida no está localizada en sus partes, sino en las propiedades colectivas emergentes del todo que ellas crean, y sus componentes son exclusivamente partes físicas.

La otra gran aportación que el proyecto Kauffmaniano hace a la Biología del siglo XXI es la introducción del principio de auto-organización en la explicación de la teoría evolutiva. Como se expuso anteriormente, el paradigma neo-darwinista vigente afronta serias limitaciones que pueden ser solventadas si se toman en cuenta los procesos de auto-organización de los sistemas dinámicos complejos. Jacob y Monod demostraron que los genes podían activarse o inhibirse unos a otros, y que tales circuitos genéticos podían tener patrones alternativos de activación para los genes que constituyen las distintas células *tipo* de un organismo. La pregunta central de Kauffman es: ¿cuál es la estructura de tales redes genómicas?, ¿cuáles son las reglas que gobiernan el comportamiento de los genes y sus productos acoplados en las redes de control que gobiernan la ontogénesis? Kauffman ha llegado a la conclusión preliminar de que estas redes, bajo ciertas condiciones, muestran comportamientos estadísticamente esperados. Sus modelos (las redes booleanas) son capaces de mostrar esta característica: existen propiedades estadísticamente comunes de organización en las redes genómicas o estructuras metabólicas, independientes de la selección natural, que sirven de soporte para que opere la selección natural. Estas propiedades típicas de las redes genómicas son posibles gracias a los procesos de auto-organización del sistema. La auto-organización del sistema ocurre en una región cercana al límite del caos, en tal región es donde las correlaciones, y por tanto las variaciones heredables, indispensables para la evolución, son posibles. La capacidad para evolucionar se maximiza en la frontera entre el caos y el orden, y es la selección natural la que alcanza y sostiene este estado de transición posicionado en el límite del caos. La selección natural maximiza las variaciones heredables. La adaptación es el proceso por el cual se maximiza la capacidad para evolucionar (*evolvability o adaptabilidad*), entendida ésta como la cantidad de variación heredable. Dicha adaptabilidad sólo se logra a partir de estructuras auto-organizadas sobre las cuales operan tanto la selección natural como las variaciones heredables. Esta relación entre los principios de auto-organización y selección natural, es el punto nodal que permitirá la ampliación de la teoría evolutiva y marcará el rumbo de la Biología del siglo XXI

Los planteamientos de Kauffman se pueden resumir en tres hipótesis centrales: 1) el primer sistema viviente surgió a partir de un conjunto auto-catalítico de reacciones que cruzó, en una transición de fase, cierto umbral de complejidad, haciendo posible el auto-

mantenimiento y la auto-replicación del sistema, en un rango plausible de tiempo; 2) los sistemas adaptativos complejos se adaptan y evolucionan en un régimen ordenado no muy alejado del *límite del caos*; y 3) la auto-organización es una pre-condición para la adaptabilidad (capacidad para evolucionar o *evolvability*). Esta perspectiva Kauffmaniana indica que los principios de auto-organización y selección no se contraponen, al contrario, se complementan. En esta complementariedad, el lugar que ocupa la selección natural en la explicación del proceso evolutivo debe ser redefinido ya que, por sí misma, no logra dar cuenta coherentemente de la estabilidad y flexibilidad de los sistemas biológicos; por otra parte, el lugar de la auto-organización debe ser revalorado, pues se han dado los primeros pasos para mostrar que el surgimiento de la vida y su evolución tienen lugar en una transición de fase en el límite del caos o cercana al límite del caos. Los modelos empleados por Kauffman (redes booleanas) han mostrado, a partir de numerosas simulaciones, que sus hipótesis son aceptables y que los comportamientos (o propiedades emergentes) mostrados por los sistemas complejos pueden obedecer a ciertas leyes de la complejidad o principios generales de organización. Por otro lado, es necesario puntualizar que no se ha precisado aún qué tipo de leyes pueden ser éstas, o si acaso corresponden a algún tipo de ley, ni de qué manera podría probarse empíricamente la validez de las hipótesis 2 y 3. El estudio de los sistemas complejos está en sus inicios, y el proyecto Kauffmaniano es un punto de partida.

Los trabajos de Kauffman, como se ha podido apreciar, tienen implicaciones científicas, pero también filosóficas. Por una parte, Kauffman retoma y vuelve a dar impulso a la doctrina emergentista que tiene su origen en la disputa sobre el origen de la vida que, en el siglo XIX, sostuvieron los defensores de las corrientes vitalista y mecanicista. El emergentismo Kauffmaniano sostiene: *existen leyes fundamentales complejas de organización que permiten el despliegue de nuevas propiedades a partir de sistemas de elementos (materiales) más básicos que cruzan cierto umbral de complejidad. Estas propiedades no son explicables a partir de las propiedades individuales de sus constituyentes ya que son poseídas por el "todo" y, a la vez, influyen sobre ese "todo" organizado.* En general, el emergentismo se puede clasificar como epistemológico u ontológico, dependiendo de las tesis que incorpore. El emergentismo Kauffmaniano es muy interesante porque, de una parte, resulta completamente compatible con el emergentismo

epistemológico (diacrónico estructural): sustentando la tesis del monismo físico, las propiedades sistémicas, el determinismo sincrónico, la novedad, y la impredecibilidad. De otra, puede llegar a identificarse con un emergentismo ontológico, pero es preciso aclarar que tiene limitaciones para hacerlo. Por lo tanto, la presente investigación asume que la defensa del emergentismo ontológico debe mantenerse aún como un problema abierto. La tesis sobre la irreducibilidad es parte fundamental del emergentismo ontológico, los elementos ontológicamente emergentes no son ni reducibles ni están determinados por elementos más básicos. Los elementos ontológicamente emergentes lo son de sistemas que poseen capacidades causales no reducibles a cualquiera de las capacidades causales intrínsecas de las partes. Una propiedad sistémica es irreducible cuando sus capacidades causales no están completamente determinadas por las capacidades causales de las propiedades de los elementos que componen el sistema. Si las capacidades causales del macro-nivel afectan las del micro-nivel, entonces existe alguna *influencia causal descendente* del mismo sistema o de su estructura sobre el comportamiento de las partes del sistema. La irreducibilidad de propiedades implica algún tipo de causalidad descendente: fuerte, media, o débil. La noción de causalidad descendente fuerte es difícil de conciliar con la tesis sobre el monismo físico, por lo cual, se considera sospechosamente vitalista. Además, el emergentismo Kauffmaniano no supone ningún tipo de causalidad descendente fuerte, pero, por otro lado, sí acepta un tipo de causalidad descendente débil, esto es: el nivel mayor o macro-nivel no es una sustancia, es un nivel organizacional. Los conjuntos auto-catalíticos y las redes genómicas booleanas concuerdan con esta descripción. Un problema con la causalidad descendente débil es que únicamente se puede hablar de una manera metafórica acerca de un espacio de estados de, por ejemplo, especies biológicas o estados psicológicos (pensamientos). No se pueden especificar tales estados físicamente o aplicar la descripción del espacio de fases en ningún sentido literal, además, al asumir que el macro-nivel no es una sustancia distinta a la del micro-nivel, sino simplemente una forma o nivel distinto de organización de los elementos que lo constituyen, entonces, los efectos causales pueden ser explicados a partir de los elementos del micro-nivel, siendo así asimilable con el micro-determinismo clásico del emergentismo epistemológico.

Así, los efectos causales pueden ser explicados a partir de los elementos del micro-nivel, y la tesis de la irreducibilidad, en sentido ontológico, no se sustenta. Resultando, así, que el

emergentismo del proyecto Kauffmaniano es compatible con el emergentismo epistemológico.

El trabajo de Kauffman no amplía el marco emergentista, y es discutible, por el momento, justificar a partir de éste un emergentismo ontológico, pero refuerza y reorienta el emergentismo epistemológico. A diferencia de sus predecesores, Alexander, Morgan, y Broad, Kauffman ha ido más allá del debate sobre la mera posibilidad de la emergencia. Su gran aportación a la corriente emergentista es el trabajo que ha desarrollado para describir e interpretar los procesos de organización por medio de los cuales la emergencia de una propiedad es posible. Las teorías de la complejidad, la mecánica estadística y los modelos de simulación son las herramientas utilizadas por él para ofrecer distintas interpretaciones del surgimiento de las propiedades biológicas emergentes. Kauffman está de acuerdo –así lo confirma su trabajo- con Bedau (1997) en cuanto a que el principal objetivo en una defensa de la noción de emergencia es mostrar que el estudio de los procesos que permiten el surgimiento de propiedades emergentes es útil para las ciencias empíricas. McLaughlin (1990) atribuye la caída del emergentismo inglés a motivos empíricos más que a motivos filosóficos. Kauffman, entre otros, ha contribuido al resurgimiento del emergentismo más que por motivos filosóficos por motivos empíricos, no obstante. A su favor [Kauffman 1996b, pp. 496-497] se encuentra la evidencia mostrada en el laboratorio por Lee *et al.* (1996, 1997), y Yao *et al.* (1998), sobre la posibilidad de llevar a cabo la auto-replicación de un sistema polipéptido por medio de la auto-catálisis de sus elementos (sin la necesidad de un genoma o enzimas catalizadoras). Estos logros, apenas incipientes, abren la posibilidad para suponer, justificadamente, que:

1. La vida es una propiedad de la materia que tiene más probabilidades de surgir de lo que se había pensado anteriormente.
2. Para el surgimiento de propiedades emergentes es necesario alcanzar cierto nivel de complejidad en la organización de determinados sistemas.
3. Los métodos para la búsqueda de vida en lugares distintos a la tierra cambiarán de manera radical; además, estos tipos de vida no necesariamente estarán basados en la bioquímica del ADN.

4. El desarrollo de proto-células en el laboratorio es una posibilidad real, así como también el desarrollo de nuevas proteínas, y con ello, la creación de nuevas vacunas, enzimas, y medicamentos.

Si no llegaran a establecerse las leyes del orden que el proyecto de Kauffman busca, éste no debe ser considerado un fracaso. La propuesta teórica de Kauffman ha mostrado ser capaz de generar conceptos útiles, tales como: auto-organización, evolución en el límite entre el orden y el caos, atractores y contenedores de atracción, entre otros, para entender e interpretar procesos de organización, y en especial los biológicos. Esta capacidad de generar conceptos, y no la de postular leyes, siguiendo a Mayr, es la principal fuente para el avance y desarrollo de la biología.

El proyecto Kauffmaniano es de suma importancia no porque se radicalice en contra de una teoría evolucionista basada en la selección natural y la herencia (el paradigma neo-darwinista), sino porque pretende establecer una nueva síntesis, esto es, integrar en un mismo marco explicativo la biología del desarrollo y la biología evolutiva; y procura definir una forma distinta de abordar el problema del orden biológico. En este sentido, el proyecto Kauffmaniano no es una revolución científica en los términos del análisis Kuhniano porque, si bien es cierto que representa un cambio en los problemas disponibles para el escrutinio científico (los de la biología teórica evolucionista), y en los estándares por medio de los cuales son juzgados estos problemas y sus soluciones, no rechaza la teoría o paradigma neo-darwinista vigente por ser incompatible con sus hallazgos ni supone una transformación del mundo dentro del cual el trabajo científico se hace, esto es, no se desarrolla en un mundo distinto e incompatible al de los biólogos neo-darwinistas. Por otra parte, desde el punto de vista de la doctrina emergentista, tanto el proyecto Kauffmaniano como el paradigma neo-darwinista son compatibles con ella, lo cual refuerza el argumento referente a que ambas perspectivas teóricas no se encuentran en mundos distintos.

Por otra parte, a la luz de los trabajos de Lakatos, el proyecto Kauffmaniano no se puede evaluar de otra manera que no sea el apreciarlo como un proyecto que tiene sus raíces (mas no su desarrollo) en la biología del siglo XIX y que no hizo su aparición abruptamente, como podría pensarse, en la biología teórica hacia finales del siglo XX. Pero esta

perspectiva Lakatosiana no es suficiente para explicar el carácter revolucionario del proyecto Kauffmaniano. Primero, porque su metodología sólo se aplica a “programas completamente articulados” [Lakatos 1971, pp.174]. Partiendo de este supuesto, el proyecto de Kauffman es apenas el bosquejo de un ambicioso y prometedor programa de investigación; por lo tanto, esta condición lo excluiría de tal análisis. En segundo lugar, porque, como lo apreciaron Kuhn y Feyerabend [Lakatos 1971, pp. 175], la metodología propuesta por Lakatos no es de aplicación inmediata, no ayuda, inmediatamente, a distinguir entre un programa progresivo y uno que degenera.

Si el proyecto Kauffmaniano no implica una revolución científica en el sentido Kuhniano del término, ni tampoco es, por completo, un programa de investigación progresivo del tipo propuesto por Lakatos, sí ofrece a la biología teórica (y no sólo a ella) un nuevo estilo de razonamiento científico, posiblemente tan revolucionario como lo fueron las técnicas estadísticas que transformaron la ciencia y la sociedad Europea en el siglo XIX. El estilo de razonamiento científico al que conduce el proyecto Kauffmaniano es a describir los patrones de comportamiento de los sistemas complejos, estudiando la interacción entre procesos que operan en diversas escalas de tiempo, espacio y complejidad organizacional. La clave para tal estudio es entender la relación entre los procesos microscópicos y los patrones macroscópicos.

La nueva síntesis bosquejada en el proyecto Kauffmaniano entre una biología evolutiva (de accidentes históricos) y una biología del desarrollo (de procesos repetitivos de organización), tiene implicaciones para el problema del reduccionismo en biología, y, a su vez, para la relación entre la ciencia física y la ciencia biológica. El reduccionismo es una tesis metafísica, una postura acerca de las explicaciones, y un programa de investigación. El antirreduccionismo interpreta la actual división de la biología no simplemente como un elemento temporal de nuestra ciencia que surge a partir de nuestras imperfecciones cognitivas sino como el reflejo de los niveles de organización en la naturaleza. Es esta tesis metafísica –la de que hay hechos, clases, y generalizaciones las cuales están fuera del alcance de la biología molecular- la que está en disputa entre los defensores del reduccionismo y el antirreduccionismo. El proyecto Kauffmaniano al no cumplir estrictamente con la tesis de la irreducibilidad, no soporta las versiones fuertes del

antirreduccionismo ontológico. En este sentido, el trabajo de Kauffman no implica un cambio en el estado de la disputa sostenida entre la corriente reduccionista y la antirreduccionista en torno al problema ontológico sobre las capacidades causales de las propiedades biológicas. Esto se puede explicar porque Kauffman no busca relaciones causales de ningún tipo, sino patrones de comportamiento estadísticamente comunes en las redes genómicas y metabólicas.

Es en el debate entre el reduccionismo y el antirreduccionismo en términos de una postura acerca de las explicaciones –la cual conduce a un programa o estrategia de investigación– donde la perspectiva de Kauffman tiene consecuencias. El programa reduccionista sostiene que toda biología es reducible, en primer término, a la biología molecular, y en última instancia, a la física. Desde este punto de vista, la biología es un campo temporal de estudio que, eventualmente, será remplazado por la física. El programa antirreduccionista en biología sostiene, por el contrario, que no todos los fenómenos biológicos son reducibles al campo de la biología molecular y, por tanto, al de la física. En este sentido, la biología fija su autonomía con respecto al campo de la física. Una defensa epistémica del debate entre la corriente reduccionista y antirreduccionista puede encontrar su solución –débil e insatisfactoria para ambas corrientes– al asumir que muchas explicaciones simplemente reflejan limitaciones temporales o antropocéntricas acerca de la indagación biológica. Kauffman no atribuye tales explicaciones a limitaciones en términos del conocimiento o de la condición humana, sino a que, simple y sencillamente, tales explicaciones reductivas no son en todos los casos *útiles*. Lo que muestra el proyecto Kauffmaniano es que el principio biológico de selección natural actúa sobre la organización espacial de conjuntos genéticos regidos por principios auto-organizativos, la auto-organización es solamente una parte de la explicación. Por lo tanto, una explicación sobre el origen y evolución de la vida que prescinde de la selección natural y las variaciones heredables es incompleta, pues resulta evidente que no todos los sistemas físicos complejos que experimentan procesos de auto-organización son capaces de auto-mantenerse, auto-replicarse, reproducirse, y evolucionar. Una estrategia o metodología reduccionista no es de *utilidad* para *explicar* las condiciones en las cuales se generan los patrones de comportamiento que permiten la existencia de redes genómicas correlacionadas (estructuras en las cuales un estado inicial y un estado

posterior modificados están relacionados, permitiendo con esto la existencia de variaciones heredables).

El antirreduccionismo epistémico sostenido en el proyecto Kauffmaniano es compatible con el principio de primacía explicativa, ya que los procesos en el nivel funcional proveen la mejor explicación para los procesos en el nivel molecular; o expresado de otro modo: la dinámica de los comportamientos globales de los elementos del sistema provee una mejor explicación que aquella que deriva del conocimiento individual de los constituyentes elementales. Sus modelos sobre conjuntos auto-catalíticos y redes genómicas son un claro ejemplo de ello. En este sentido, se puede afirmar que existe una *limitación explicativa* en la estrategia o metodología reduccionista para dar cuenta de todos los procesos y estructuras biológicas en términos exclusivamente de una biología molecular. Esta limitación no se debe a posibles restricciones cognitivas del investigador, a la falta de conocimiento acerca de las propiedades de los constituyentes de un sistema, como tradicionalmente se argumenta. Se debe más bien a la *utilidad* de la explicación con respecto a los problemas y las preguntas planteadas por los investigadores. En lugar de utilizar el término autonomía, se debe utilizar el término *límite explicativo*, el cual se ajusta más al enfoque Kauffmaniano, pues elimina la idea de que existen campos autónomos insalvablemente inconexos (la biología molecular y la no-molecular), y resalta el papel que tiene la práctica científica que involucra el planteamiento de problemas, preguntas, y el desarrollo de estrategias de investigación, para determinar los límites explicativos o la utilidad explicativa. Por lo tanto, el reduccionismo y antirreduccionismo en biología, en tanto que son metodologías para proveer explicaciones, serán de mayor o menor utilidad a tal propósito en función de un problema, una serie de preguntas y una práctica de investigación concreta. Este pragmatismo explicativo establece una relación entre las preguntas y las respuestas ofrecidas en el contexto de las creencias de un investigador. Tales creencias reflejan las presuposiciones de los investigadores, quienes, en conjunto, determinan la calidad y el valor explicativo de diversas respuestas sobre la base de una rigurosa y juiciosa justificación.

Con respecto a la relación entre la ciencia física y la ciencia biológica, ya que el proyecto Kauffmaniano no satisface el principio de realidad autónoma, puede decirse que no aporta

elementos definitivos para argumentar una autonomía fundamental entre ambas ciencias. Pero, por otra parte, en un plano muy general, la síntesis que ha bosquejado Kauffman entre la biología del desarrollo y la teoría evolucionista neo-darwinista pretende relacionar dos principios fundamentales: el de la auto-organización de los sistemas físicos y el de la selección natural de los sistemas biológicos. Esta posición, lejos de dividir los campos de la física y de la biología, o de pretender reducir la biología a la física o a la química, conecta ambos campos para poder explicar el orden y el desarrollo de los seres vivos. En este sentido, el nuevo estilo de razonamiento científico que distingue al proyecto Kauffmaniano, por un lado, ayuda en el ámbito de la práctica científica a poner menos énfasis en las divisiones disciplinares. Y esto es fácil de explicar ya que su proyecto no está enfocado hacia el estudio de las particularidades físicas, químicas, o biológicas de los sistemas, sino hacia los patrones globales de relación y organización. Desde esta perspectiva, para el estudio de la forma y la función de los seres vivos (o sistemas adaptativos complejos) es indispensable mantener una estrecha relación explicativa entre la física y la biología, y no una bien delineada autonomía. Por otro lado, en el ámbito de la práctica filosófica a lo que el proyecto Kauffmaniano ayuda (en torno al problema del reduccionismo en biología y la relación entre la ciencia física y la biológica) es a reafirmar la importancia que tiene la práctica de la investigación científica para determinar la utilidad de cualquiera de las dos metodologías explicativas. También nos habla de la relación entre ambos campos de conocimiento, y nos explica que su estrecho nexo o autonomía es un hecho que solamente puede ser apreciado *a posteriori*, a partir de la práctica científica. Esta postura pragmática aquí expuesta, no se encuentra de forma explícita en los trabajos desarrollados por Kauffman; él nunca lo ha expresado así, pero, no obstante, después de una lectura cuidadosa de su proyecto resulta inevitable esta interpretación. De otra manera nos enfrentaríamos a una constante serie de contradicciones entre posturas reduccionistas y antirreduccionistas –las cuales se pueden apreciar en el conjunto de citas mostradas a lo largo de la presente investigación- en los trabajos que debemos a Kauffman.

Esta interpretación pragmática se hace a la luz de la teoría sobre la representación científica y el realismo científico. El realismo científico implica el cumplimiento de tres tesis lógicamente independientes: 1) el realismo metafísico: existe un mundo externo independiente de nuestras concepciones y conocimiento; 2) el realismo semántico: el

lenguaje captura efectivamente el significado real de cada objeto; y 3) el realismo epistémico: podemos conocer el mundo externo (tenemos acceso a él). La negación de al menos una de ellas supone un antirrealismo científico. El problema entre el reduccionismo y el antirreduccionismo en biología, y, a su vez, la relación existente entre la ciencia física y la ciencia biológica, se relacionan con la tesis del realismo epistémico: podemos conocer el mundo externo, su constitución última, sus límites, y su organización. Para el realista científico, los modelos y las teorías representan el mundo *tal como es*. La representación científica establece una relación entre aquello que se utiliza para representar el mundo (por ejemplo, entidades lingüísticas) y el mundo mismo. Una teoría de la representación debe establecer las condiciones a partir de las cuales un modelo o teoría puede representar algo otro, no importando si la representación es, o no, exacta, verdadera, o completa, lo importante es que desempeñe una función representacional unidireccional e inferencial (Suárez 2004). Algunas teorías de la representación se basan sobre la idea de similitud, isomorfismo, isomorfismos parciales, o capacidades inferenciales. Por otra parte, siguiendo otra línea de pensamiento, Rorty (1983) rechaza por completo cualquier tipo de representacionalismo porque, para él, es inaceptable suponer que pueden existir “trozos” de mundo, ya sea en forma de teorías, modelos, etc., que corresponden y encajan inequívocamente con el mundo *tal como es*. Una postura intermedia la ofrece Giere (2004), considerando la representación, pragmáticamente, como una *actividad científica* que se puede entender de la siguiente manera: los científicos utilizan modelos para representar aspectos del mundo para propósitos específicos (*S* usa *X* para representar *W* para propósitos *P*). Esta forma de considerar las representaciones captura el sentido Kauffmaniano con respecto al problema del reduccionismo y el antirreduccionismo. Siguiendo a Giere (2004, pp. 751), “no puede haber base científica para afirmar que un modelo se ajusta mejor a la estructura completa del universo”, por ejemplo, ¿qué modelo se ajusta mejor a la estructura del universo para explicar la propiedad de la *vida*: el modelo de la doble hélice del ADN de Watson y Crick, o los modelos de simulación sobre los conjuntos auto-catalíticos de Kauffman? La respuesta es: no hay manera de determinarlo, pero lo que sí se puede saber es que en función del tipo concreto de problema que se encara (o propósito), será la utilidad del modelo, y esto sólo puede ser determinado a partir de la misma práctica científica, *a*

posteriori. Esta posición, que se ajusta a la encontrada en los trabajos de Kauffman, implica un antirrealismo científico epistémico.

Por último, ya que el proyecto Kauffmaniano es un lugar de partida y no uno de llegada, existen aún muchas preguntas sin respuesta. Futuras investigaciones deben afrontar los problemas que en tales preguntas se plantean. Las siguientes son sólo algunas de ellas:

1. Si, como Kauffman argumenta, en un principio la vida surgió como un metabolismo carente de un sistema genético primitivo, ¿por qué razón, eventualmente, surgió un sistema genético?
2. En este mismo sentido, si la selección natural opera al nivel de las redes genómicas maximizando las variaciones heredables, entonces ¿qué factor discriminó (seleccionó) entre un metabolismo con un sistema genético primitivo y uno carente de él? ¿Fue un accidente?
3. ¿Cómo se puede reconciliar una ciencia histórica repleta de accidentes y de variaciones al azar con una de leyes o principios de organización?
4. ¿Qué validez puede llegar a tener una teoría que simplemente no toma en cuenta las particularidades de los elementos que constituyen el campo y los objetos de estudio?
5. ¿En qué medida la selección afecta los patrones generales de la evolución, el morfoespacio?, ¿en qué medida son los patrones ontogénicos el resultado de la selección?
6. ¿Completa la biología del desarrollo su programa de investigación al integrar en su campo las teorías de la auto-organización?, ¿una teoría general de la biología puede ser alcanzada al integrar en un mismo marco explicativo los principios de la auto-organización y la selección natural?
7. ¿Pueden los atractores (extraños, de ciclo estable, de punto fijo, etc.) considerarse como objetos ontológicamente reconocibles?
8. ¿Es aceptable una solución pragmática al problema entre el reduccionismo y el antirreduccionismo en biología?
9. ¿Es factible el desarrollo de células sintéticas en el laboratorio?

10. ¿Son válidos sus modelos para explicar los procesos de organización en sistemas tan distintos y diversos como lo son los ecológicos, los económicos, los tecnológicos, o los sociales?

El estudio de los sistemas complejos y de la auto-organización tienen aún mucho que aportar a las ciencias en general, y a la ciencia biológica en particular, en este siglo que comienza. Su problemática se centra en entender cómo se organizan los sistemas, cómo se puede generar orden en un sistema a partir de un comportamiento caótico o en el límite entre el comportamiento ordenado y el caótico, y cómo se pueden desarrollar comportamientos complejos en el universo a partir de algunas reglas simples. Kauffman es pionero de esta empresa científica en el campo de la biología teórica, su proyecto es un obligado punto de referencia y de partida. El filósofo de la ciencia no puede permanecer indiferente ante este movimiento representado por las ciencias de la complejidad. Es parte de su tarea reflexionar sobre las consecuencias que esta corriente, joven aún, tiene con respecto a la filosofía misma, con respecto a nuestro conocimiento del universo. Reflexionar sobre la manera en la cual el proyecto Kauffmaniano nos ayuda a conocer el universo ha sido la intención primaria de la presente investigación. Dicho de otro modo, la tarea que hemos intentado cumplir ha sido reflexionar filosóficamente sobre la ciencia de nuestros días.

Apéndice 1. Teorías de la Complejidad y el Caos

1.1 Teoría del Caos: principios y alcances

Teoría del caos es el nombre popular con el que se reconoce el estudio de los sistemas dinámicos deterministas no-lineales. El impacto del estudio de tales sistemas, en el ámbito cultural y científico en el siglo XX, es objeto de un gran debate (Hayles, 1998). Por una parte, hay quienes afirman que: “[...] la ciencia experimenta un cambio radical de perspectiva [Prigogine 1997, pp. 181]”; “[...] reconocer la complejidad, hallar los instrumentos para describirla, y efectuar una relectura dentro de este nuevo contexto de las relaciones cambiantes del hombre con la naturaleza, son los problemas cruciales de nuestra época [Prigogine 1997, pp. 48]”. Desde esta perspectiva, Prigogine sugiere que la naturaleza del universo es de carácter complejo y que las aproximaciones deterministas, mecanicistas, y reduccionistas, propias de la ciencia clásica positivista, son insuficientes para describir este tipo de naturaleza, al mismo tiempo, sugiere que una nueva ciencia basada en los principios de la complejidad y el caos nos ayudará a conseguir tal descripción.

Por otra parte, hay quienes sostienen que se ha sobreestimado el impacto de la llamada teoría del caos:

“Se sobreestima porque la teoría del caos no se opone a la ciencia normal: es ciencia normal. Sigue el mismo procedimiento que cualquier otra disciplina científica para acreditar a sus miembros, diseñar protocolos de investigación y evaluar resultados. Al igual que otras ciencias, cree que las explicaciones económicas son mejores que las múltiples. El nombre que Mitchell Feigenbaum dio a su descubrimiento de que los sistemas disipativos no-lineales siguen un camino predecible hacia el caos indica lo lejos que se encuentran las ciencias del caos de criticar el universalismo dentro de las humanidades: lo llamó teoría de la universalidad”[Hayles 1998, pp. 36].

En las siguientes líneas, el objetivo es aclarar a que se le llama *Teoría del Caos*, cuáles son los principios que operan para los sistemas llamados *caóticos*, y cuál es el alcance de tales estudios.

1.1.1 Definición preliminar

La teoría del caos puede ser definida como el estudio cualitativo de comportamientos no periódicos e inestables en sistemas dinámicos deterministas no-lineales [Kellert 1993, pp.34]. La teoría de los sistemas dinámicos distingue cinco tipos principales de patrones temporales que pueden existir en una serie de tiempo de datos longitudinales (listas de valores producto de iteraciones): fijos, periódicos, caóticos, ruido de color (rosa, negro, etc.), o aleatorios (ruido blanco). Los sistemas deterministas son sistemas cuyo estado presente es completamente determinado por sus condiciones iniciales.

1.1.2 Supuestos y características

En primer lugar, los sistemas caóticos son caracterizados por la hipersensibilidad que presentan con respecto a sus condiciones iniciales (conocido esto también como efecto mariposa) y, segundo, porque sus elementos son diversos e interactúan en una forma no-lineal. En tercer lugar, los patrones de comportamiento caóticos se pueden distinguir por su dimensionalidad, y por la naturaleza de la relación que mantienen las variables (Dooley y Van de Ven, 1999), como se muestra en la tabla A1.1. Comenzando por las dos últimas características, se puede decir que la dimensionalidad se refiere al número de dimensiones de un espacio geométrico, esto es, las variables o factores que forman el sistema. Un sistema caótico es representado por una baja dimensionalidad, dicho de otro modo, está formado por pocas variables (aproximadamente, no más de diez), a diferencia del casi infinito número implicado en los sistemas aleatorios. Las variables en los sistemas caóticos están interrelacionadas, y sus interacciones son no-lineales, a diferencia de los sistemas aleatorios en donde las variables del sistema son independientes. La no-linealidad hace referencia al hecho de que las causas y los efectos no son proporcionales.

Este tipo de sistemas puede aparentar un comportamiento aleatorio, pero, en realidad, muestra patrones identificables de comportamiento, ellos no se comportan al azar debido a

que el futuro del sistema caótico depende de la condición inicial, pero su comportamiento nunca se repite. Estos sistemas nunca se repiten exactamente porque su comportamiento futuro es extremadamente sensible a la condición inicial. La extrema sensibilidad a las condiciones iniciales significa que no es posible determinar la condición actual con la exactitud requerida para predecir el futuro.

Clasificación de sistemas dinámicos en función de la naturaleza de sus interacciones y su dimensionalidad

Naturaleza de las interacciones	<u>Interdependiente</u>	<i>Comportamiento caótico</i>	<i>Ruido de color</i>
	<u>Independiente</u>	<i>Comportamiento periódico</i>	<i>Comportamiento aleatorio</i>
		<u>Pocas variables</u>	<u>Muchas variables</u>
		Dimensionalidad	

Tabla A1.1 Clasificación de sistemas dinámicos

Una medida para determinar el grado de sensibilidad a las condiciones iniciales y, por tanto, una medida para determinar si un sistema es caótico, o no, es a través del cálculo del exponente de Lyapunov, cuya fórmula se muestra a continuación:

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{|\delta x(t)|}{|\delta x(0)|}$$

El exponente de Lyapunov (λ) representa el rango promedio de separación entre las trayectorias o comportamientos de un sistema. Un valor de $\lambda \leq 0$ indica que el sistema es estable. Un valor de $\lambda > 0$ indica que el sistema es altamente sensible a las condiciones iniciales, y, por tanto, el sistema exhibe un comportamiento caótico (Cvitanović *et al.*, 2002).

Una cuarta característica que muestran los sistemas caóticos es *la auto-similitud* y su representación en espacios de dimensiones no enteras. Éstas características se pueden

analizar con herramientas capaces de reconocer los patrones de comportamiento de los sistemas y de definir límites dentro de los cuales el comportamiento es impredecible. Estas herramientas son: la geometría fractal, los espacios de fase, y los atractores extraños.

1.1.2.1 Dependencia sensible a las condiciones iniciales

El popularmente conocido efecto mariposa fue introducido inicialmente por el meteorólogo Edward Lorenz, y en el campo de estudio de los sistemas dinámicos deterministas no-lineales se reconoce con el nombre técnico de “*dependencia sensible de las condiciones iniciales*”. La expresión hace referencia y explica cómo es que una pequeña perturbación del estado inicial de un sistema puede traducirse, en un breve lapso de tiempo, en un cambio importante en el estado final del mismo. Lo que el efecto mariposa viene a decir es, en resumen, que si agita hoy, con su aleteo, el aire de Pekín, una mariposa puede modificar los sistemas climáticos de Nueva York el mes próximo. La dependencia sensible de las condiciones iniciales del sistema explica, por tanto, que la más mínima diferencia en la descripción del estado del sistema provoca que sistemas inicialmente muy parecidos diverjan exponencialmente con el transcurso del tiempo (Crutchfield, 1990).

2.1.2.2 Exponente de Lyapunov

Para comprender el significado de los sistemas caóticos, y lo que el exponente de Lyapunov representa, se recurrirá al ejemplo del juego de “pinball” (ver figura A1.1). El ejemplo del pinball es para la dinámica caótica lo que el péndulo es para los sistemas integrables. Antes de entrar en detalles, es preciso recapitular la diferencia que existe entre los sistemas deterministas y los sistemas estocásticos.

Un sistema determinista es un sistema cuyo estado presente está completamente determinado por sus condiciones iniciales. Para los estocásticos, las condiciones iniciales determinan sólo, parcialmente, el estado presente de un sistema debido al ruido, o debido a otra circunstancia externa que va más allá de nuestro control. Para un sistema estocástico el

estado presente refleja las condiciones iniciales más el reconocimiento del ruido encontrado a lo largo del camino.

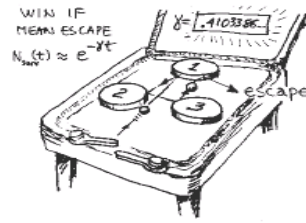


Figura A1.1. Juego de Pinball

Dos trayectorias de pinball que comienzan muy cerca una de otra se separan exponencialmente con el tiempo, y en un número finito (en la práctica, uno muy pequeño) de rebotes, su separación, dada por $\delta x(t)$, alcanza la magnitud L , la longitud lineal característica del sistema entero (ver figura A1.2). Esta propiedad de sensibilidad a las condiciones iniciales puede ser cuantificada como:

$$|\delta x(t)| \approx e^{\lambda t} |\delta x(0)|$$

Donde λ , el índice medio de separación de las trayectorias del sistema, es llamado exponente de Lyapunov.

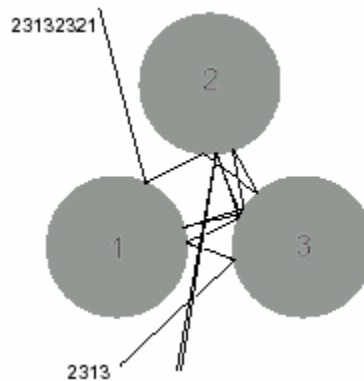


Figura A1.2. Sensibilidad a las condiciones iniciales.

De la ecuación anterior se deduce que el exponente de Lyapunov está dado por:

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln |\delta x(t)| / |\delta x(0)|$$

Cuando $\lambda \leq 0$ indica que el sistema es estable. Los exponentes de Lyapunov negativos son característicos de sistemas disipativos o no conservativos. Tales sistemas exhiben estabilidad asintótica. Entre más negativo es el exponente más grande es la estabilidad. Un valor de $\lambda > 0$ indica que el sistema es altamente sensible a las condiciones iniciales, esto es, el sistema exhibe un comportamiento caótico. Puntos cercanos, no importa que tan cercanos, tenderán a separarse de manera arbitraria.

Ahora, para cualquier conjunto de datos iniciales con precisión finita δx , la dinámica del sistema es predecible hasta un tiempo de Lyapunov finito dado por:

$$T_{\text{Lyap}} \approx -1/\lambda \ln |\delta x/L|$$

Esto a pesar de las simples, deterministas e infalibles leyes que norman el movimiento del pinball.

Por otra parte, un exponente de Lyapunov, por sí mismo, no conduce al caos. Uno podría intentar jugar un juego de pinball con 1 o 2 discos y las trayectorias sólo se separarían, nunca se encontrarían nuevamente. Lo que también se requiere es mezclar la unión, una y otra vez, de las trayectorias. Mientras, localmente, las trayectorias cercanas se separan, la dinámica es confinada a una región global finita del espacio de fase, y, así, necesariamente las trayectorias son replegadas y pueden aproximarse nuevamente una a otra de una manera arbitrariamente cercana, un número infinito de veces. En el ejemplo hay topológicamente 2^n distintas n trayectorias de rebote que se originan a partir de un disco dado. De modo más general, el número de trayectorias diferentes con n rebotes puede ser cuantificado como:

$$N(n) \approx e^{hn}$$

En donde la entropía topológica h ($h = \ln 2$ en el caso del ejemplo) es el índice de crecimiento del número de trayectorias distintas.

Cuando un físico dice que un cierto sistema exhibe un comportamiento caótico, lo que quiere decir es que el sistema obedece leyes deterministas de evolución, pero la salida es altamente sensible a pequeñas incertezas en la especificación del estado inicial. La palabra “caos” en este contexto toma un significado técnico restringido. Si un sistema es localmente inestable (exponente de Lyapunov positivo) y globalmente mezclado (entropía positiva) se dice que es caótico (Cvitanović *et al.*, 2002).

1.1.2.3 No-linealidad

En clara conexión con la dependencia sensible de las condiciones iniciales que comparten todos los sistemas caóticos, encontramos una segunda característica general: la *no-linealidad*. Para la ciencia clásica, causa y efecto se corresponden totalmente y –aún más– se relacionan proporcionalmente. Es decir, en el ideal clásico, una buena teoría científica debería identificar y asociar plenamente un efecto –o fenómeno– con una causa; además, debería contemplar que una variación en la causa habría de provocar, igualmente, una variación proporcional en el efecto que se sigue de esa causa. La no-linealidad ocurre porque ésta vincula el producto de dos distintas variables y no su suma. La no-linealidad implica que pequeñas interacciones pueden provocar grandes consecuencias y viceversa. La no-linealidad nos permite entender porque en un sistema complejo es inoperante tratar de encontrar relaciones causales directas (Bar-Yam, 1997).

2.1.2.4 Geometría fractal, espacio de fase y atractores extraños

La geometría fractal desarrollada por Benoit Mandelbrot es la creación de formas auto-similares por medio de la iteración recursiva de funciones. La forma básica es $x(n+1) = f(x(n))$, y el conjunto de Mandelbrot es la ecuación $Z(n+1) = (Z(n))^2 + C$, en donde Z es un número complejo variable y C un número complejo fijo. Para iniciar, se introducen los dos primeros números complejos Z y C , y se indica al ordenador que tome el resultado de la suma de los dos números y la próxima vez lo ponga en el lugar de Z .

La geometría fractal se distingue básicamente por dos características: primero, no está basada en dimensiones de números enteros, sino en fracciones (de ahí su nombre) y, segundo, la geometría fractal genera formas auto-similares y auto-contenidas en diferentes niveles, ninguno más básico que otro (Koperski, 2001).

La importancia de la geometría fractal como apoyo al estudio de los sistemas caóticos radica en cuatro puntos principales:

- 1) Provee dimensiones adicionales y más cercanas a la realidad en comparación a la geometría Euclidiana.
- 2) Los sistemas dinámicos pueden ser representados en series de tiempo, y para esto, es importante tomar en cuenta sus dimensiones.
- 3) Los fractales son escalares, esto es, se puede reducir o ampliar su análisis para observar detalles, mientras que las formas básicas se conservan.
- 4) La mayoría de los sistemas caóticos son complejos, y estos exhiben conductas extrañas asociadas con límites o campos que no pueden ser representados en dimensiones enteras. Estos son los llamados atractores extraños.

La geometría fractal ayuda a describir las formas que adoptan los atractores extraños en un espacio de fase. Las dimensiones del espacio de fase representan variables dentro del sistema, y el espacio de fase ayuda a mostrar cómo ellas cambian a lo largo del tiempo. Por lo tanto, no se debe confundir una órbita en espacio de fase con una trayectoria del espacio. Se trata, en cambio, de un mapa de los cambios en el comportamiento del sistema a lo largo de ciclos repetidos.

Un atractor es una región del espacio de fases que ejerce una influencia (atracción) sobre las variables del sistema. El contenedor de atracción es el conjunto de todos los estados iniciales que evolucionan dentro del atractor [Crutchfield 1990, pp. 4]. Existen varios tipos de atractores, entre ellos los más representativos son los atractores de punto fijo, los atractores de ciclo límite, y los atractores extraños. Los atractores de punto fijo pueden ser ejemplificados por medio de la figura de un péndulo. El comportamiento del péndulo está definido por dos variables: posición y velocidad. Si el péndulo está sujeto a la fricción y a la resistencia del aire, eventualmente perderá su impulso y se detendrá. En la figura A1.3 se

puede apreciar que tipo de comportamiento describe un atractor de punto fijo. El punto central representa un péndulo con impulso cero y desplazamiento cero: un péndulo en reposo. Como este punto parece atraer trayectorias hacia sí, los matemáticos lo llaman atractor de punto fijo.

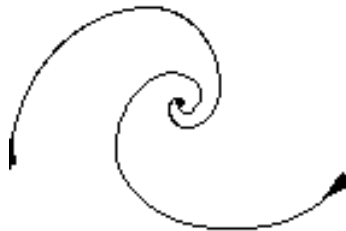


Figura A1.3. Atractor de punto fijo

A su vez, el péndulo puede también representar un ejemplo de atractor de ciclo límite. Si el péndulo es impulsado de tal suerte que los efectos de la fricción y la resistencia del aire no altera su comportamiento de vaivén, el péndulo no estará atraído hacia un punto fijo, sino que será impulsado hacia una senda cíclica en el espacio de fases. Esta senda se llama de ciclo límite. La figura A1.4 representa este tipo de atractores. Un péndulo de ciclo límite impulsado mecánicamente resiste pequeñas perturbaciones. Los sistemas con comportamientos de ciclo límite resisten, tomando en cuenta los efectos de retroalimentación, cambios o perturbaciones sobre sus variables.

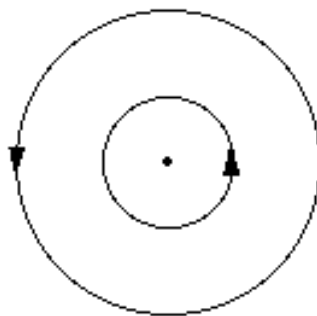


Figura A1.4 Atractor de ciclo límite

A diferencia de los anteriores tipos de atractores, los atractores extraños (A1.5) son curvas infinitas que nunca se interceptan dentro de un área finita o volumen. El atractor extraño es una maraña de trayectorias que nunca se repiten, y que, a su vez, describen el

comportamiento de las variables en cierto sistema. En un periodo de tiempo determinado puede apreciarse el patrón de comportamiento del atractor extraño (Sprott, 1995).

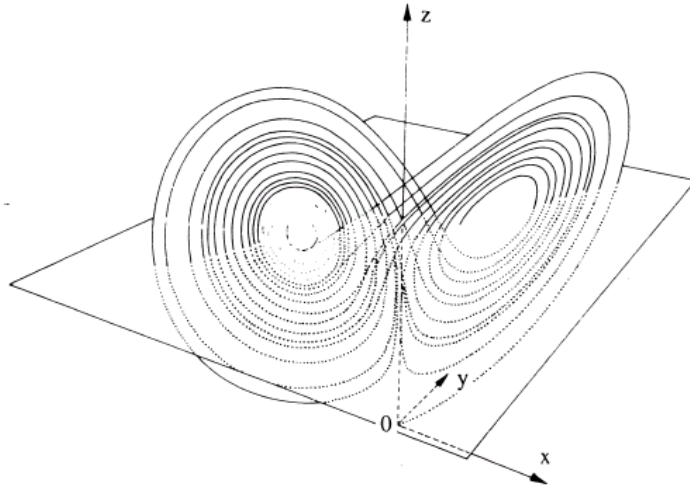


Figura A1.5. Atractor extraño de Lorenz

2.1.3 Alcance de la teoría: Bricmont vs. Prigogine

En su artículo “Chaos in science or science of chaos?”, J. Bricmont hace una crítica sobre los excesos y malas interpretaciones que han sido hechas a partir de los trabajos de Prigogine, incluyendo al mismo Prigogine, desde la perspectiva de la física clásica. Lo que está sobre la mesa de discusión es, principalmente, la noción clásica de trayectorias individuales para explicar los comportamientos caóticos contra la noción de funciones de distribución utilizada por Prigogine para el mismo efecto. Según Bricmont, apoyado en la noción de trayectorias individuales, lo que muestra un sistema de comportamiento caótico es la confirmación de las leyes deterministas de la naturaleza; por el contrario, Prigogine apoyado en la noción de funciones de distribución, sugiere que lo que tales sistemas muestran es la compatibilidad de la dinámica con el azar intrínseco [Prigogine 1997, pp.164].

Bricmont destaca algunos pasajes de la obra *Las leyes del caos* en los cuales Prigogine hace afirmaciones radicales del tipo:

“[...] la noción de caos nos conduce a repensar la noción de “ley de la naturaleza” [(Prigogine 1994, pp. 15) en Bricmont 1995, pp. 161].

“Para los sistemas caóticos, las trayectorias son eliminadas a partir de una descripción probabilística [...] La descripción estadística es irreducible” [(Prigogine 1994, pp. 59) en Bricmont 1995, pp. 161].

En este sentido, Prigogine –según Bricmont- sugiere que la existencia de sistemas dinámicos caóticos marca la partida radical de una visión fundamentalmente determinista del mundo, vuelve obsoleta la noción de trayectoria y ofrece una nueva explicación sobre la irreversibilidad. Bricmont atribuye tal divergencia a la confusión que existe al hacer del concepto de determinismo un sinónimo del concepto de predicción. Determinismo depende de lo que las leyes de la naturaleza son. Dado el estado de un sistema en un tiempo dado, tenemos una fórmula (una ecuación diferencial o un mapa) que da, en principio, el estado del sistema en un tiempo posterior. Para obtener una predicción, uno tiene que ser capaz de medir el estado presente del sistema con suficiente precisión para computar con la fórmula dada (para resolver las ecuaciones del movimiento). La diferencia radica en que, aunque un sistema se comporta de acuerdo a ciertas leyes, las variables del sistema no pueden ser medidas con precisión suficiente, de tal suerte que cualquier error o variación en el estado inicial hace que, en el transcurso del tiempo, no sea posible determinar el estado futuro del sistema. En este sentido, un sistema caótico es determinista pero no predecible porque sus variables son altamente sensibles a las condiciones iniciales, en otras palabras, dos trayectorias cualesquiera de un sistema que parten del mismo punto se alejarán arbitrariamente una de otra después de un tiempo dado (exponente de Lyapunov positivo $\lambda > 0$). El que un sistema sea impredecible no entra en conflicto con una postura determinista de las leyes de la naturaleza.

Por el otro lado, Prigogine sostiene que “[...] La “realidad básica” que debemos describir, ya no son las trayectorias, sino las funciones de distribución ρ ” [Prigogine 1997, pp. 167]. Prigogine apunta hacia una explicación de los comportamientos caóticos en términos de la mecánica estadística de procesos irreversibles lejos del equilibrio. En una dinámica caótica no se pueden seguir trayectorias individuales por un periodo de tiempo largo; lo que sí es alcanzable es una descripción de la geometría del conjunto de posibles salidas y la evaluación de promedios de tiempos y espacios. La razón por la cual no se pueden seguir

trayectorias individuales es porque en un tiempo finito las trayectorias de una región finita del espacio de fase se traslaparán con cualquier otra región y, en ese sentido, se esparcirán sobre la extensión entera del espacio de fase asintóticamente accesible. Dada esta situación, la idea principal es remplazar los valores esperados de los observables (trayectorias) por los valores esperados de los generadores funcionales. Esto asocia un operador de evolución con un observable dado, y relaciona el valor esperado del observable con el valor de “Eigen” del operador de evolución. Prigogine lo pone en los siguientes términos:

“Esto, por supuesto, recuerda notablemente la situación cuántica en donde se sustituye la descripción en términos de trayectorias por otra en términos de funciones de onda ψ . Como bien sabemos por la mecánica cuántica, la evolución de la función ondular, y otras operaciones que podemos efectuar con funciones de onda, se expresan actualmente en términos de operadores que actúan sobre estas funciones de onda [...]. Por motivos completamente distintos, ahora, en el ámbito teórico de los sistemas dentro de la dinámica tradicional, tenemos, incluso, que reformular esta dinámica en términos de una teoría de operadores que actúan sobre las funciones de distribución ρ . En este contexto, es muy interesante que la existencia de un “caos” dinámico del azar al nivel dinámico nos conduzca, precisamente, a la posibilidad de definir ese tipo de nuevos operadores” [Prigogine 1997, pp. 167].

Lo que se puede concluir de estas dos posturas es que Bricmont tiene razón cuando sostiene que los argumentos de Prigogine utilizados para asumir una nueva naturaleza de la realidad son una sobreestimación de la teoría, y que lo único que consiguen es llegar a la misma conclusión asumida por la corriente clásica, la cual es, a saber, que el comportamiento de un sistema caótico no se puede predecir para periodos largos de tiempo. Pero los defensores de Prigogine tienen razón al argumentar que la utilización de funciones de distribución en lugar de trayectorias tiene ventajas prácticas en el análisis de sistemas dinámicos no-lineales de baja dimensionalidad.

La teoría del caos no proporciona una solución al debate filosófico acerca de cuál es la realidad esencial: el ser o el devenir. La teoría del caos, como tal, no intenta desaparecer la escisión entre ciencias naturales y ciencias humanas. La teoría del caos no valida o invalida la noción de dualismo cartesiano. La teoría del caos no es incompatible con una visión positivista de la ciencia. El tema de la irreversibilidad y la flecha del tiempo –aunque aquí no se aborda- son problemas, aún, abiertos.

Dentro de la teoría del caos existen dos enfoques básicos. En el primero, el caos se considera como precursor y socio del orden, y no como su opuesto. Aquí se centra la atención en el surgimiento de la auto-organización que emerge del caos, o, según la terminología de Prigogine, en las estructuras disipativas que surgen en sistemas fuera del equilibrio cuando la producción de entropía es alta. La comprensión de que los sistemas ricos en entropía facilitan en lugar de impedir la auto-organización fue una coyuntura decisiva para la reevaluación contemporánea del caos. La figura central de este enfoque es Ilya Prigogine. El segundo enfoque destaca el orden oculto que existe dentro de los sistemas caóticos. Usado de este modo, el término caos difiere de la verdadera aleatoriedad, porque se puede demostrar que contiene estructuras profundamente codificadas, llamadas atractores extraños. Mientras los sistemas verdaderamente aleatorios no muestran un esquema discernible cuando se les organiza en el espacio de fase, los sistemas caóticos se concentran en una región limitada y trazan modelos complejos en ella. El descubrimiento de que el caos posee dentro de sí profundas estructuras de orden es más notable debido a la amplia gama de sistemas que demuestran este comportamiento. Algunos investigadores vinculados a esta línea son: Edward Lorenz, M. Feigenbaum, Benoit Mandelbrot y Robert Shaw [Hayles, 1998].

La rama de los atractores extraños difiere del paradigma del orden a partir del caos por la atención que presta a los sistemas que siguen siendo caóticos. Para ellos, el foco de atención está en el ordenado descenso hacia el caos, más que en las estructuras organizadas que de él emergen. Prigogine tiene fuertes vínculos con los círculos intelectuales franceses, y la rama del orden a partir del caos es conocida por su tendencia a extrapolar consecuencias filosóficas, más allá de los resultados experimentales. La rama de los atractores extraños, por el contrario, se ha caracterizado por teorizar poco; sus adeptos prefieren concentrarse en problemas de interés práctico inmediato.

Estas distintas orientaciones conducen a diferentes tipos de conclusiones. Prigogine considera que la importancia fundamental de la línea del orden a partir del caos reside en su capacidad para resolver el problema metafísico: reconciliar el ser con el devenir. Para él, es revolucionaria debido a lo que puede decirnos sobre la flecha del tiempo. Por otro lado, la rama de los atractores extraños destaca la capacidad de los sistemas caóticos para generar

nueva información. Al repetirse con muy escasa frecuencia, los sistemas caóticos generan modelos de complejidad extrema, en los que las zonas de simetría se mezclan con las zonas de asimetría, recorriendo todas las escalas de magnitud. Para los investigadores de esta rama, la conclusión importante es que la naturaleza puede renovarse precisamente porque es rica en desorden y sorpresa.

En el presente, la teoría es, en la práctica, aplicable sólo a sistemas con una baja dimensionalidad intrínseca –el número de grados de libertad necesarios para capturar su dinámica. Si el sistema es muy turbulento (la descripción de su dinámica de largo plazo requiere un espacio de altas dimensiones intrínsecas) los resultados son escasos o nulos. En general, tratando de evitar toda sobreestimación o subestimación, este es el alcance de la teoría del caos.

1.2 Criticidad Auto-Organizada (*Self-Organized Criticality*)

La *criticidad auto-organizada* puede definirse sencillamente así: sistemas complejos grandes y alejados del equilibrio, formados por muchas partes interactuantes, espontáneamente evolucionan hacia un punto crítico [Solé 1999, pp. 158].

Una metáfora simple que ilustra esta noción, es la provista por un montón de arena (ver figura A1.6). Si añadimos lentamente arena, un grano por vez, al principio tenemos una pila plana de arena, y los granos permanecen donde ellos caen. Los granos son básicamente independientes y su comportamiento es descrito por la fuerza de gravedad y la de fricción. Pero, en tanto que la pendiente se incrementa, se alcanza un régimen en donde las avalanchas, que involucran los granos en interacción, ocurren todo el tiempo.

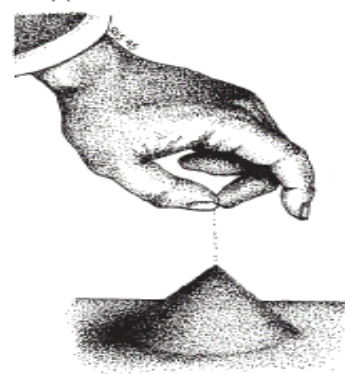


Figura A1.6. Montón de arena

En el estado de *criticidad auto-organizada*, existe un sistema complejo con su propia dinámica emergente, este estado no puede ser anticipado a partir de las propiedades de las unidades individuales (granos de arena). En un contexto ecológico, la adición de una nueva especie podría llevar a los ecosistemas cerca de un estado crítico, donde la colectividad, y

no las especies individuales serían los objetos relevantes en el largo plazo [Solé 1999, pp. 158].

1.3 Estructuras Disipativas y Orden por Fluctuaciones

Prigogine sostiene que las estructuras disipativas son formas alejadas del equilibrio. El equilibrio es el estado máximo de entropía. En el equilibrio, la energía útil se ha disipado. Estas estructuras para mantener su forma deben disipar la entropía constantemente para que no crezca dentro de la identidad y la “mate” con equilibrio. La disipación de la entropía requiere de una entrada constante de materiales y energía, por lo cual las estructuras disipativas deben formarse en situaciones alejadas del equilibrio. En la termodinámica clásica, una medida de la eficacia de un proceso es una baja producción de entropía. Las estructuras disipativas son eficaces precisamente por la razón contraria. En su alta generación de entropía y continua apertura a la entrada fluctuante de energía, la estructura disipativa trasciende la termodinámica del sistema cerrado. Esto hace también de la estructura disipativa una paradoja. Puede sobrevivir sólo permaneciendo abierta a un intercambio fluido de materia y energía con el medio ambiente (Briggs y Peat 1996).

Prigogine descubrió que los sistemas que se alejan del equilibrio (aquel punto donde las partículas del sistema están paralizadas o se mueven al azar en desorden total), presentan características que eventualmente los llevan a un estado donde eventualmente surge el orden. Para Prigogine orden y caos es un flujo continuo que permea los sistemas disipativos en contacto con el medio ambiente. Estos importan energía para su desarrollo y crecimiento, mientras exportan deshechos en formas más entrópicas. Este material expuesto al medio ambiente sirve de alimento a otros sistemas que lo usarán nuevamente para convertirlo en ingredientes de desarrollo.

El orden por fluctuaciones es un mecanismo que hace posible el desarrollo de la auto-organización, fenómeno que resulta elemental para la formación de estructuras disipativas. Las fluctuaciones son el mecanismo molecular para verificar la inestabilidad. Pequeñas variaciones en las fluctuaciones del sistema son despreciables y éste permanece en estado

estable, no así cuando las fluctuaciones se amplifican, en este punto el sistema se vuelve inestable, el sistema está en el límite del caos, punto donde se genera la auto-organización que llevará al sistema a otro estado diferente de orden (Prigogine, 1997). Las fluctuaciones ponen a prueba constantemente la estabilidad de un sistema vivo, y en cierto momento una o varias de estas fluctuaciones pueden hacerse tan fuertes que empujarán al sistema, a través de situaciones de inestabilidad, hacia una estructura totalmente nueva, que a su vez será fluctuante y relativamente estable. La estabilidad de los sistemas vivos nunca es absoluta. Persistirán mientras las fluctuaciones no superen un nivel crítico dimensional, pero cada sistema está siempre dispuesto a transformarse, a evolucionar.

Este modelo básico de evolución, ideado por Prigogine y sus colaboradores para describir las estructuras químicas disipativas, se ha aplicado con éxito desde entonces, para detallar la evolución de los sistemas biológicos. En palabras de Prigogine:

“Un sistema biológico, que metaboliza y se reproduce, debe, efectivamente, intercambiar energía y materia con el entorno; por lo tanto, funciona como sistema abierto. Por otra parte, el mantenimiento de la vida y el crecimiento dependen de un sinnúmero de reacciones químicas y de fenómenos de transporte, cuyo control implica la intervención de factores no-lineales (activación, inhibición, auto-catalización directa, etc.). Finalmente, el aporte de energía o de materia se efectúa, generalmente, en condiciones inestables, ya que los productos de reacción son expulsados del sistema vivo o enviados a otros lugares de la célula para que desempeñen otras funciones. En resumen: el funcionamiento de los sistemas biológicos parece cumplir las condiciones necesarias para que aparezcan las estructuras disipativas”. [Prigogine, 1997, pp. 316].

Para Prigogine, las estructuras disipativas desempeñan un papel importante en el mantenimiento de la vida y en la explicación de su origen (Prigogine, 1997).

1.4 Autopoiesis

Dos neurobiólogos, Maturana y Varela, desarrollaron la teoría de la autopoiesis. Acuñaron este término para describir los patrones generales de organización comunes a todos los sistemas vivos. “Auto” se refiere a la autonomía de un sistema para organizarse a sí mismo; “poiesis” significa producción. La Autopoiesis es una red de producción y procesos, en la cuál la función de cada componente participa en la producción o transformación de otro componente en la red y la constituyen (la red) como una unidad

concreta en el espacio en el cual existe por la especificación del dominio topológico de su delimitación como red. En este sentido, la red entera se produce a sí misma. En un sistema viviente auto-organizativo, el producto de su operación es su propia organización [Varela 1979, pp.13].

La autopoiesis puede surgir en un sistema molecular si las relaciones de producción están enlazadas de tal forma que ellas producen los componentes que especifican la unidad del sistema, el cual existe sólo mientras es producido activamente por tal concatenación de procesos, es decir, la autopoiesis surge en un sistema molecular sólo cuando la relación que acopla estas relaciones es producida y se mantiene constante a través de la producción de los componentes moleculares que constituyen el sistema a través de esta concatenación. [Varela 1979, pp. 26-27].

Dos conceptos centrales, entre otros, en la teoría de la autopoiesis de Varela y Maturana son los de organización y estructura. La organización de un sistema no especifica las propiedades de sus componentes los cuales comprenden (o abarcan) a la máquina como un sistema concreto, ésta sólo especifica las relaciones que debe generar para constituir a la máquina o sistema como una unidad. Aunque un sistema puede estar formado por muchas estructuras diferentes, para que se constituya como una entidad concreta en un espacio dado sus componentes reales deben, por una parte, ser definidos en ese espacio, y, por otra, tener las propiedades que les permiten generar las relaciones que lo definen [Maturana y Varela 1980, pp. 77]. La estructura de una unidad particular compuesta es la serie de componentes que le constituyen y las relaciones entre ellos mismos: reales, estáticas, o dinámicas en un espacio particular [Maturana 1988, pp.6.iv].

1.5 Sinérgica

Haken (1977) en Alemania, casi al mismo tiempo que Prigogine, comenzó a desarrollar un programa de investigación el cual pretendía revelar algunas leyes generales de la auto-organización y la evolución, las cuales, a su vez, son comunes en procesos de naturaleza completamente distinta: física, química, biológica, psicológica, y social; al cual llamó

sinérgica. La sinérgica puede entenderse como la teoría del comportamiento cooperativo, la cual pretende explicar algunos de los mecanismos físicos necesarios para la formación de estructuras complejas (Knyaseva, 1998).

La *sinérgica* puede ser considerada como un estado desarrollado de la cibernética tradicional y el análisis de los sistemas estructurales. Mientras la cibernética investiga el funcionamiento de sistemas complejos utilizando un modelo abstracto de *caja negra*, la sinérgica estudia algunos mecanismos para la formación de estructuras complejas, trata de ver dentro de la *caja negra*. Mientras la cibernética elabora algoritmos y métodos para el control de los sistemas, la sinérgica analiza el proceso de auto-control y auto-organización de los sistemas complejos (Knyaseva, 1998). El estudio de Haken sobre el comportamiento cooperativo (sinérgica), se originó a partir de las investigaciones sobre la radiación coherente del *láser*. El *láser* es un ejemplo paradigmático de la sinérgica.

1.6 Sistemas Adaptativos Complejos

Un sistema adaptativo complejo se define en términos de sus partes, del comportamiento de esas partes, y del comportamiento emergente del sistema. Un sistema adaptativo complejo consiste de agentes interdependientes. En estos sistemas, el comportamiento de cada agente produce una serie mínima de reglas simples, y los agentes, en su conjunto, producen patrones sistémicos de comportamiento. Holland (1996), ha analizado extensivamente los sistemas adaptativos complejos y ha identificado siete atributos básicos en todos ellos: cuatro propiedades: agregación, no-linealidad, flujo y diversidad; y tres mecanismos para el cambio: las marcas distintivas (*tagging*), los modelos internos, y los bloques de construcción.

Los elementos básicos de un sistema adaptativo complejo son los agentes. Los agentes son unidades semi-autónomas que buscan maximizar su aptitud para desarrollarse en el transcurso del tiempo. Los agentes registran su entorno y desarrollan un esquema. Los esquemas son modelos internos que definen cómo es interpretada la realidad y cuál es la respuesta apropiada hacia un estímulo dado. Estos esquemas, regularmente, son

desarrollados a partir de esquemas más básicos conocidos como bloques de construcción. Cuando una observación no se asemeja con lo esperado, un agente puede tomar acción para adaptar la observación para que se ajuste a un esquema existente, de igual manera, un agente puede intencionalmente alterar esquemas para ajustarse mejor a la observación. Un esquema puede cambiar a través de mutaciones intencionales, o aleatorias, o por combinación con otros esquemas. Cuando un esquema cambia, generalmente tiene el efecto de hacer más robusto al agente, más confiable, o más capaz en términos de su variedad requerida (capacidad de adaptarse a un amplio rango de condiciones).

La agregación entra en el estudio de los sistemas adaptativos complejos en dos sentidos. El primero se refiere a una manera estándar de simplificar los sistemas complejos, por ejemplo, nosotros agrupamos cosas en categorías –árboles, coches, animales- y los tratamos como equivalentes. Si encontramos algo nuevo, esa escena la descomponemos en categorías familiares y de esa manera la integramos a nuestra experiencia, de igual manera, pueden generarse escenas nuevas que nunca antes hemos visto por la recombinación de las categorías. La agregación en este sentido es una de las principales técnicas para construir modelos. El segundo sentido de la agregación hace referencia a la emergencia de comportamientos complejos a gran escala desde la interacción agregada de agentes menos complejos. Los comportamientos emergentes son aquellas actividades que no pueden ser predichas desde las partes del sistema. Un agregado puede tomarse, también, como un agente de nivel superior o meta-agente, estos a su vez pueden formar un agregado que resultaría en un agregado de agregados, un meta-meta-agente.

Hay un mecanismo que consistentemente facilita la formación de agregados: el tagging. Este mecanismo hace las veces de una bandera o marca distintiva que permite que diferentes agentes se aglutinen en torno a ésta. Por ejemplo, en la Internet, un tagging puede entenderse como un título que propone un foro de discusión, este título es la marca distintiva que atrae a los individuos que comparten el interés por un tema en particular. Este mecanismo permite la creación de agregados y la interacción selectiva, esto es, permite a los agentes seleccionar entre agentes u objetos que de otra manera serían indistinguibles. También conduce a la emergencia de meta-agentes y organizaciones que persisten a pesar de que sus componentes estén cambiando constantemente.

La no-linealidad ocurre porque ésta vincula el producto de dos distintas variables y no su suma. La no-linealidad implica que pequeñas interacciones pueden provocar grandes consecuencias y viceversa. La no-linealidad nos permite entender por qué en un sistema complejo es inoperante tratar de encontrar relaciones causales directas.

En el contexto de los sistemas adaptativos complejos, pensamos el flujo sobre una red de nodos y conectores, por ejemplo, los nodos pueden ser fábricas, y los conectores las rutas de transporte que permiten el flujo de bienes entre las fábricas. En términos generales, los nodos son procesadores –agentes- y los conectores diseñan las posibles interacciones. En los sistemas adaptativos complejos el flujo a través de las redes varía sobre el tiempo, además, los nodos y las conexiones pueden aparecer y desaparecer en tanto que los agentes se adaptan o fallan para adaptarse. Así, ni el flujo ni las redes son fijas en el tiempo. Son patrones que reflejan la adaptación al cambio en tanto que el tiempo transcurre y la experiencia se acumula. Las *tags* (marcas de referencia) definen las redes delimitando las interacciones críticas. Existen dos propiedades para el flujo. La primera es el efecto multiplicador el cual ocurre si alguien inyecta recursos adicionales en algún nodo. El segundo es el efecto de reciclaje. Este efecto surge cuando los recursos iniciales del sistema son nuevamente utilizados para producir nuevas y diferentes respuestas. El efecto de reciclaje puede aumentar las salidas de un sistema.

La diversidad es la propiedad que tienen los de los sistemas adaptativos complejos para, por un lado, cubrir un hueco dejado por un agente en un nicho, y por otro, desarrollar nuevas formas en un ambiente determinado. La persistencia de algún agente individual, ya sea un organismo, una neurona, o una organización, depende del contexto provisto por los otros agentes. Cada tipo de agente llena un nicho que es definido por las interacciones centradas en los agentes. Si se remueve algún tipo de agente del sistema, creando así un hueco, el sistema responderá típicamente con una cascada de adaptaciones resultando en un nuevo agente que llena el hueco. El nuevo agente típicamente ocupará el mismo nicho que el agente desaparecido y proveerá muchas de las interacciones perdidas. La diversidad observada en un sistema adaptativo complejo es producto de la adaptación progresiva. Cada adaptación abre la posibilidad para más interacciones y nuevos nichos.

Los modelos internos son mecanismos para la anticipación. En los procesos de agregación, los detalles son eliminados para enfatizar patrones selectos. Esta maniobra es básica para construir modelos. Como los modelos tratados son del agente, éste debe seleccionar patrones en el torrente de entradas que recibe y entonces debe convertir esos patrones en cambios en su estructura interna. Finalmente, los cambios en la estructura, en el modelo, deben permitir al agente anticiparse a las consecuencias que siguen cuando el patrón es nuevamente encontrado. Es de utilidad distinguir dos tipos de modelos internos: los modelos tácitos y los modelos explícitos. Un modelo interno tácito simplemente prescribe una acción corriente bajo una predicción implícita de algún estado futuro deseado. Un modelo interno explícito es usado como base para la exploración explícita, pero interna, de alternativas, un proceso llamado “ver hacia delante”. Si las acciones resultantes anticipan satisfactoriamente las consecuencias futuras, entonces el agente tiene un modelo interno efectivo, de otra manera resultará ser inefectivo. Con una forma apropiada de conectar los créditos futuros con las acciones corrientes, la evolución puede favorecer modelos internos efectivos y eliminar aquellos que resultan inefectivos.

Los bloques de construcción son generadores. Para entender este concepto más ampliamente tomemos como ejemplo la capacidad que tienen los seres humanos de descomponer escenas complejas en partes. Cuando se hace esto, las partes pueden ser utilizadas y reutilizadas en una gran variedad de combinaciones para formar otro tipo de escenas, siendo muy diferentes unas de otras. Otro ejemplo, si nos encontráramos con un neumático pinchado mientras conducimos un automóvil por la carretera, inmediatamente nos encontraríamos con un conjunto de acciones plausibles, aun en el supuesto de que nunca antes nos hubiéramos enfrentado a tal situación. No podemos tener una lista preparada de reglas para todas las situaciones posibles. Por esta razón descomponemos la situación y evocamos reglas que nos conducen a escenas como “carretera”, “automóvil”, “neumático” que forman parte de nuestros bloques de construcción. Por ahora, cada uno de estos bloques de construcción han sido puestos en práctica y refinados en cientos de situaciones probablemente diferentes. Cuando una nueva situación es encontrada, se combinan los bloques de construcción relevantes y ya probados, para así modelar la situación en una forma que sugiera acciones y consecuencias apropiadas. Los bloques de construcción sirven para dar regularidad a un mundo complejo.

Un sistema adaptativo complejo está formado por agentes, los cuales buscan adaptarse al medio, esto incluye la adaptación con otros agentes y la adaptación a la disponibilidad de recursos (información, materia y energía) y sus restricciones. Los agentes se agrupan formando cúmulos de agentes, estos cúmulos pueden ser a su vez considerados agentes de un sistema en otro nivel de amplitud, a estos se les reconoce como meta-agentes. A esta propiedad que tienen los agentes de agruparse se le denomina agregación. La agregación permite entender cómo se forma un sistema cualquiera, desde los modelos internos de los agentes hasta la conformación de una ciudad, por citar un ejemplo, y permite identificar cómo se integran los sistemas a partir de diferentes niveles de amplitud o jerarquías. Los agentes pueden pertenecer a uno o varios sistemas en diferentes niveles de amplitud en un mismo lapso de tiempo y pueden, pero no necesariamente, competir al mismo tiempo con ciertos agentes en un nivel, y cooperar en otro. Los agentes pueden agregarse gracias a un mecanismo denominado tagging o marcas distintivas. Los agentes forman cúmulos porque existen marcas que les permiten distinguirse de los demás y facilita su agrupación y transacción, esto es válido a todos niveles, tanto en los fundamentales (el agrupamiento de reglas, bloques de construcción y modelos internos), como en los de máxima amplitud (la agrupación de meta-agentes). Este mecanismo permite, además de la creación de agregados, la interacción selectiva, esto es, permite a los agentes seleccionar entre agentes u objetos que de otra manera serían indistinguibles.

Los agentes interactúan con su ambiente y entre ellos mismos, recibiendo y emitiendo energía, materia, e información. Los agentes desarrollan reglas para procesar los estímulos que reciben del entorno y para poder efectuar una o una serie de respuestas. En otras palabras, los agentes detectan estímulos codificándolos, procesan los estímulos ya codificados de acuerdo a una serie de reglas internas y efectúan una o una serie de respuestas ya decodificadas que actúan sobre el ambiente. Con reglas que se encuentran activas simultáneamente, los agentes pueden combinar reglas que ya han sido probadas para describir una situación completamente nueva. Las reglas llegan a ser bloques de construcción que permiten al agente responder ante diversas situaciones aun cuando estas nunca antes hayan sucedido. Los agentes logran la adaptación gracias a dos mecanismos: los bloques de construcción y los modelos internos. Las diferentes reglas que actúan simultáneamente cuando un agente o grupo de agentes recibe un estímulo del ambiente,

compiten entre sí. Aquellas que muestran una respuesta adecuada ante el estímulo son reforzadas, y las que provocan una respuesta negativa, eliminadas. Las reglas que prueban su efectividad son utilizadas para formar bloques de construcción.

No siempre es posible que el agente obtenga respuestas directas ante los estímulos del ambiente, del tal forma que desarrolla modelos internos, que son mecanismos que le permiten anticipar acciones ante eventos o situaciones futuras. Es de utilidad distinguir dos tipos de modelos internos: los modelos tácitos y los modelos explícitos. Un modelo interno tácito simplemente prescribe una acción corriente bajo una predicción implícita de algún estado futuro deseado. Un modelo interno explícito es usado como base para la exploración explícita, pero interna, de alternativas, un proceso llamado “ver hacia delante”. Si las acciones resultantes anticipan satisfactoriamente las consecuencias futuras, entonces el agente tiene un modelo interno efectivo, de otra manera resultará ser inefectivo. Con una forma apropiada de conectar los éxitos futuros con las acciones corrientes, la evolución puede favorecer modelos internos efectivos y eliminar aquellos que resultan inefectivos.

Hasta este punto, se ha descrito cómo los agentes se agrupan y auto-seleccionan, cómo perciben su ambiente y como responden a él. Los agentes se agregan e interactúan entre ellos y con el ambiente. Esta interacción se da en términos de tres propiedades fundamentales: flujo, no-linealidad y diversidad.

Los agentes establecen relaciones de intercambio, esto es, existe un flujo de materia, energía o información entre ellos y el ambiente. Las *tags* (marcas de referencia) definen las redes delimitando las interacciones críticas. El flujo puede tener un efecto multiplicador, el cual ocurre si alguien, de algún modo, inyecta recursos adicionales; además, puede tener un efecto de reciclaje. Este efecto surge cuando los recursos iniciales del sistema son nuevamente utilizados para producir respuestas nuevas y diferentes. El efecto de reciclaje puede aumentar las salidas de un sistema. Este flujo, que se da en las interacciones del sistema, es de naturaleza no-lineal, esto es, la no-linealidad implica que pequeñas variaciones en las interacciones pueden provocar grandes consecuencias y viceversa.

Estos mecanismos y propiedades que se han descrito pueden darse en forma simultánea. Los agentes reciben estímulos del ambiente y procesan la información para ofrecer una

respuesta, en este procesamiento compiten las reglas para definir cuales son aquellas que permitirán responder en forma más adecuada y cuáles podrán recombinarse para actuar ante situaciones nunca antes presentadas y, así, poder anticiparse a situaciones futuras aun sin que nunca antes se hayan presentado.

Mientras tanto, en este proceso, el flujo de las interacciones puede amplificar los efectos de éstas y reciclarse, ya que aquello que produce un agente o grupo de agentes puede ser utilizado nuevamente como insumo por estos mismos. A su vez, este flujo puede provocar que pequeñas variaciones provoquen grandes consecuencias. Este proceso de interacciones y cambio lleva a que algunos agentes no se adapten y dejen nichos por cubrir. La diversidad es la propiedad que tienen los sistemas adaptativos complejos para, por un lado, cubrir un hueco dejado por un agente en un nicho y, por otro, desarrollar nuevas formas en un ambiente determinado. Si se remueve algún tipo de agente del sistema, creando así un hueco, el sistema responderá típicamente con una cascada de adaptaciones resultando en un nuevo agente que llena el hueco. El nuevo agente típicamente ocupará el mismo nicho que el agente desaparecido y proveerá muchas de las interacciones perdidas. La diversidad observada en un sistema adaptativo complejo es producto de la adaptación progresiva. Cada adaptación abre la posibilidad para más interacciones y nuevos nichos. Esto da, por decirlo de alguna manera, vida, movimiento y riqueza al sistema.

Existen, por último, dos elementos más: el aprendizaje y la auto-organización. El aprendizaje se da en términos de la capacidad que muestran los agentes para desarrollar reglas válidas que les permitan adaptarse dentro del contexto donde se desenvuelven, y de la capacidad que desarrollan para modificar sus modelos internos con el fin de anticipar situaciones futuras que afecten su capacidad de adaptación. Los sistemas adaptativos complejos muestran esta capacidad de aprendizaje. Por otro lado, la auto-organización es el proceso por medio del cual se hace posible la formación de estructuras emergentes ordenadas, que no son impuestas desde el exterior, sino que se producen en el interior de un sistema rico en entropía. En resumen: el proceso de auto-organización en los sistemas adaptativos complejos se presenta como el resultado de la dinámica no-lineal mostrada por los agentes en el interior del sistema, que llevan al sistema a una región al borde del caos,

única región donde puede desarrollarse un proceso de auto-organización y el surgimiento de nuevas propiedades emergentes.

Apéndice 2. Wimsatt y el problema de la agregatividad.

Sobre la base de un sistema de amplificación (circuitos compuestos por amplificadores de señales), Wimsatt (1997, 2002) pone a prueba sus criterios para determinar la agregatividad o la falla en la agregatividad de un sistema. Antes de comenzar a describir el ejemplo, es pertinente recordar los criterios propuestos por Wimsatt:

“Para que la propiedad de un sistema sea un agregado con respecto a la descomposición del sistema en partes y sus propiedades, las siguientes condiciones deben cumplirse:

Suponga $P(S_i) = F\{[p_1, p_2, \dots, p_n(s_1)], [p_1, p_2, \dots, p_n(s_2)], \dots, [p_1, p_2, \dots, p_n(s_m),]\}$ es una función de composición para la propiedad del sistema $P(S_i)$ en términos de las propiedades de las partes p_1, p_2, \dots, p_n , de las partes s_1, s_2, \dots, s_m . La función de composición es una ecuación –una identidad sintética entre niveles.

1. **IS (Inter-sustitución)**. La invariabilidad de la propiedad del sistema bajo la operación del re-arreglo de partes en el sistema, o el intercambio de cualquier número de partes con el correspondiente número de partes, a partir de una clase de partes equivalentes relevantes. (Esto debería parecer ser satisfecho si la función de composición es *conmutativa*).
2. **QS (Tamaño de la escala)**. Similitud Cualitativa de la propiedad del sistema (identidad, o si esta es una propiedad cuantitativa, diferenciación en términos de valor) bajo la adición o sustracción de partes. (Esto sugiere la definición inductiva de una clase de funciones de composición).
3. **RA (Descomposición y Re-Agregación)**. La invariabilidad de la propiedad de un sistema bajo operaciones que involucran la descomposición y re-agregación de partes. (Esto sugiere una función de composición *asociativa*).
4. **CI (Linealidad)** No hay interacción cooperativa o inhibitoria entre las partes del sistema para esta propiedad.

Las condiciones **IS** y **RA** son implícitamente relativas a la descomposición de las partes dadas, como lo son (menos obvio) **QS** y **CI**. *Para que la propiedad de un sistema sea verdaderamente agregativa, debe cumplir estas condiciones para todas las posibles descomposiciones del sistema en sus partes. Esta es una condición extremadamente fuerte, y raramente encontrada*”. [Wimsatt 1997, pp. S376].

La figura 2A.1a muestra el radio total de amplificación del circuito, ΣA , el cual es el producto de los radios de amplificación de cada amplificador: $\sigma A = A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4$. Para la figura 2A.1b, el radio de amplificación está dado por: $\sigma A = A_4 \times A_1 \times A_3 \times A_2$. Este radio

de amplificación permanece inalterado a pesar de las intersubstituciones que cambiaron el orden de los amplificadores (o la conmutación de los amplificadores en la función de composición). Para la figura 2A.1c, el radio total de amplificación está dado por: $\Sigma A_{(n)} = \sigma A_{(n-1)} \times A_{(n)}$. El radio total de amplificación, para este caso, permanece *cualitativamente* igual cuando se añaden o sustraen partes. Para la figura 2A.1d, el radio de amplificación no varía con la adición de subsistemas –es asociativa: $A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 = (A_1 \times A_2) \times (A_3 \times A_4)$

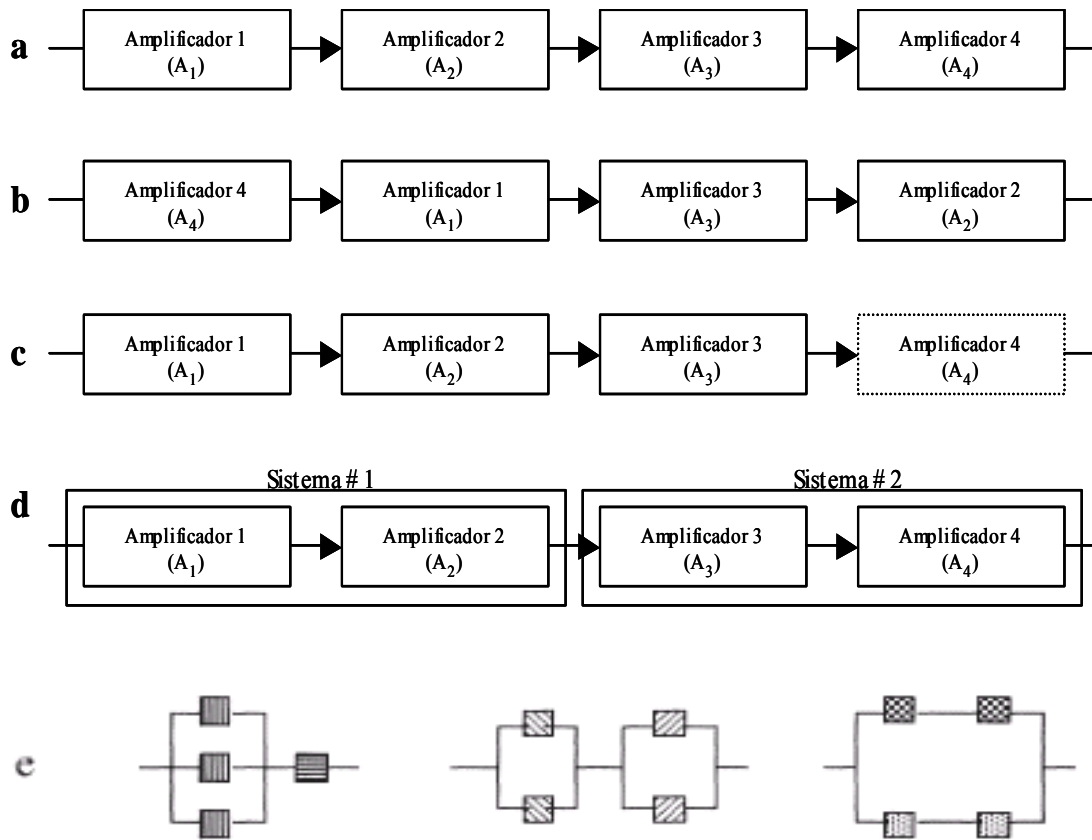


Figura 2A.1a-1e. Condiciones de agregatividad ilustradas con amplificadores lineales linealizados. Tomado de: Wimsatt [1997, pp. S378].

Para los amplificadores ordenados en serie, el radio total de amplificación, ΣA , es el producto de los radios de amplificación de los componentes (figura 2A.1a), una función de composición la cual es conmutativa (figura 3A.1b, condición **IS**), asociativa (Figura 2A.1c, condición **RA**), y cualitativamente similar cuando se añaden o sustraen partes (figura

2A.1c, condición **OS**). Esto parece no contradecir la agregatividad de la propiedad del radio de amplificación.

Las intersustituciones de 2A.1a hasta 2A.1d, preservan una estricta organización serial de los amplificadores. Esta es una restricción organizacional del sistema, pero es posible, también, conectarlos de manera diferente, como las tres redes serie-paralelo ilustradas en la figura 2A.1e. Sus radios de amplificación se pueden calcular de la siguiente manera:

$$\text{Para el primer circuito, } \Sigma A = [(A_1 + A_2 + A_3) / 3] \times A_4 = (3a / 3) \times a = a^2$$

$$\text{Para el segundo circuito, } \Sigma A = [(A_1 + A_2) / 2] \times [(A_3 + A_4) / 2] = (2a / 2) \times (2a / 2) = a^2$$

$$\text{Para el tercer circuito, } \Sigma A = [(A_1 \times A_3) / 2] + [(A_2 + A_4) / 2] = (a^2 / 2) + (a^2 / 2) = a^2$$

Si todos los componentes (amplificadores), A_1, A_2, A_3, A_4 tienen un radio de amplificación igual, sea éste a , el radio total de amplificación, ΣA , de todos los circuitos, es igual en todos los casos, esto es, igual a a^2 . Para un circuito serial, el radio total de amplificación sería $a \times a \times a \times a = a^4$. De aquí se puede observar que el cambio en el patrón de organización provocó una reducción del radio total de amplificación, de a^4 a a^2 .

Pero suponiendo que los radios de amplificación de los componentes no son iguales, si $A_1 = a, A_2 = 2a, A_3 = 4a$, y $A_4 = 8a$, entonces:

$$\text{Para el primer circuito} = [(7/3) a] \times 8a = 56/3 a^2 = 18.67a^2$$

$$\text{Para el segundo circuito} = (3/2) a \times 6a = 9a^2$$

$$\text{Para el tercer circuito} = (5/2) a^2 + (10/2) a^2 = 7.5a^2$$

Estos amplificadores, con los mismos valores, pero organizados en serie, dan un valor de $64a^2$. Así que, comparando, se puede apreciar que la manera en la cual los amplificadores son conectados, marca una diferencia. A pesar de la primera impresión, el radio de amplificación no es una propiedad agregativa porque, por una parte, varía con la descomposición interna de los amplificadores (las partes de los amplificadores), y, por otra, varía con la agregación de amplificadores no organizados serialmente.

BIBLIOGRAFÍA

- Ablowitz, R. (1939): "The Theory of Emergence", *Philosophy of Science*, 6 (1), pp. 1-16
- Alberch, P. (1994): "Review of *The Origins of Order*", *Journal of Evolutionary Biology* 7, pp. 518-519
- Alexander, S. (1920): *Space, Time, and Deity*, 2 vols., London, Macmillan
- Anderson, C. (2002): "Self-organization in Relation to Several Similar Concepts: are the Boundaries to Self-Organization Indistinct?", *The Biological Bulletin*, 202, pp. 247-255
- Baas, N. A., Emmeche, C. (1997): "On Emergence and Explanation", *Intellectica*, 25, pp.67-83
- Bada, J. L. (2004): "How Life Began on Earth: A Status Report", *Earth and Planetary Science Letters*, 226, pp. 1-15
- Bada, J. L., Lazcano, A. (2002): "Some Like It Hot, But Not the First Biomolecules", *Science*, 296 (5575), pp. 1982-1983
- Bak, P., Chen, K. (1991): "Self-Organized Criticality", *Scientific American*, pp. 46-54
- Bak, P., Boettcher, S. (1997): "Self-Organized Criticality and Punctuated Equilibria", *Physica D*, 107, pp. 143-150
- Baltscheffsky, H., Blomberg, C., Liljenstrom, H., Lindahl, B.I., Arhem, P. (1997): "On the Origin and Evolution of Life: An Introduction", *J. Theor. Biol.*, 187, pp. 453-459
- Bartsev, S. I., Mezhevikin, V. V., Okhonin, V. A. (2001): "Life as a Set of Matter Transformation Cycles: Ecological Attributes of Life", *Adv. Space Res.*, 28(4), pp. 607-612
- Bar-Yam, Y. (1997): *Dynamics of Complex Systems*, Massachusetts, Addison-Wesley
- Baylis, C. A. (1929): "The Philosophic Functions of Emergence", *The Philosophical Review*, 38 (4), pp. 372-384
- Bedau, M. (1997): "Weak emergence", (*Noûs*) *Philosophical Perspectives*, 11, *Mind, Causation, and World*, 31, pp. 375-399
- Bedau, M., Packard N. (2003): "Evolution of Evolvability Via Adaptation of Mutation Rates", *BioSystems*, 69, pp. 143-162
- Berenda, C. W. (1953): "On Emergence and Prediction", *The Journal of Philosophy*, 50 (9), pp. 269-274.

Berger, G. (2003): "Deterministic Hypotheses on the Origin of Life and of its Reproduction", *Medical Hypotheses*, 61 (5-6), pp. 586-592

Bickhard, M. H. (2004): "Process and Emergence: Normative Function and Representation". *Axiomathes - An International Journal in Ontology and Cognitive Systems*, 14, pp. 135-169. Disponible en: <<http://www.lehigh.edu/~mhb0/mhb0.html>>

----- (2000) "Emergence", in P. B. Andersen, C. Emmeche, N. O. Finnemann, P. V. Christiansen (eds.), *Downward Causation. Minds, Bodies and Matter*, Aarhus, University of Aarhus Press, pp. 322-348

Bishop, R. C. (2004): "Non-Equilibrium Statistical Mechanics Brussels-Austin Style", *Studies In History And Philosophy Of Modern Physics*, 35, pp.1-30

Blazis, D. (2002): "Introduction: The limits to Self-Organization in Biological Systems", *Biological Bulletin*, 202, pp. 245-246

Bricmont, J. (1995): "Science of Chaos or Chaos in Science", *Physicalia Magazine*, 17, pp. 159-208

Briggs, J. P., Peat, F.D. (1996): *A Través del Maravilloso Espejo del Universo: la Nueva Evolución en la Física, Matemática, Química, Biología y Neurofisiología que Conduce a la Naciente Ciencia de la Totalidad*, Barcelona, Gedisa

Broad, C.D. (1925): *The Mind and Its Place in Nature*, London, Routledge & Kegan Paul. Reimpresión disponible en: <<http://www.ditext.com/broad/mpn/mpn.html>>

Brockman, J. (2000): "La idea de evolución" (Introducción), en J. Brockman (ed.), *La Tercera Cultura: Más allá de la Revolución Científica*, Barcelona, Tusquets

Burian, R. M., Richardson R. C. (1990): "Form and Order in Evolutionary Biology: Stuart Kauffman's Transformation of Theoretical Biology", *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 2, pp. 267-287

Castrodeza, C. (2002): *Los Límites de la Historia Natural: Hacia una Nueva Biología del Conocimiento*, Madrid, Akal

----- (2003): *La Marsopa de Heidegger*, Madrid, Dykinson

Campell, D. T. (1974): "Downward Causation in Hierarchically Organized Biological Systems", in F. Ayala, and T. Dobzhansky (eds.), *Studies in the Philosophy of Biology*, Berkeley, University of California Press, pp. 179-186

Campbell, R. J., Bickhard, M. H. (2003): "Physicalism, Emergence, and Downward Causation", *Australian National University*. Disponible en: <<http://hdl.handle.net/1885/41068>>

Cech, T.R. (1989): "Self-Replication?", *Nature*, 339, pp. 507-508

----- (1986): "RNA as an Enzyme", *Scientific American*, 255, pp. 64-75

Crane, T. (2001): "The Significance of Emergence", in B. Loewer and G. Gillett (eds.), *Physicalism and its Discontents*, Cambridge University Press

Crutchfield, J. P. (1994): "Is Anything Ever New? Considering Emergence", The Santa Fe Institute Working Paper 94-03-011. Disponible en: <<http://www.sfi.edu/>>

----- (1990): "Complexity: order contra chaos". in S. Yasui and T. Yamakawa (eds.), *Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic and Neural Networks, Iizuka, Japan*, Singapore, World Scientific Publishers, 127. Disponible en: <<http://www.santafe.edu/projects/CompMech/papers/COCCTitlePage.html>>

Cunningham, B.(2001): "The Reemergence of Emergence", *Philosophy of Science*, 68, pp. S62-S75

Cunningham, G. W. (1929): "Emergence and Intelligibility", *International Journal of Ethics*, 39 (2), pp. 148-166

Cvitanovi'c P., Artuso R., Dahlvqvist, P., Mainieri, R., Tanner, G., Vattay, G., Whelan, N., Wirzba, A. (2002): *Classical and Quantum Chaos*, Niels Borh Institute for Astronomy, Physics and Geophysics. Disponible en: <<http://www.nbi.com/ChaosBook>>, Denmark, version 9.2.3

Darwin, C. (2000): *El Origen de las Especies*, Madrid, Alba

Dooley, K., Van de Ven, A. (1999): "Explaining Complex Organizational Dynamics", *Organization Science*, 10 (3), pp. 358-372

Dover, G. (1993): "On the Edge", *Nature*, 365, pp. 704-706

Dyson, Freeman. (1999): *Origins of Life*, New York, Cambridge University Press

Eigen, M. (1971): "Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules", *Naturwissenschaften*, 58, pp. 465-523

Eigen, M., Schuster, P. (1978): "The hypercycle. A principle of natural self-organization. Part B: The abstract hypercycle", *Naturwissenschaften*, 65, pp. 7-41

----- (1978): "The hypercycle. A principle of natural self-organization. Part C: The realistic hypercycle", *Naturwissenschaften*, 65, pp. 341-369

----- (1979): *The Hipercycle: A Principle of Natural Self-Organization*, Berlin, Springer

Emmeche, C., Koppe, S., Stjernfelt, F. (2000): "Levels, Emergence, and Three Versions of Downward Causation", in P. B. Andersen, C. Emmeche, N. O. Finnemann and P. V. Christiansen (eds.), *Downward Causation. Minds, Bodies and Matter*, Århus, Aarhus University Press, pp. 13-34

Emmeche, C., Koppe, S., Stjernfelt, F. (1997a): "Explaining Emergence: Towards an Ontology of Levels", *Journal for General Philosophy of Science*, 28, pp. 83-119

Emmeche, C. (1997c): "Aspects of Complexity in Life and Science", *Philosophica*, 59, pp. 41-68

----- (1997b): "Defining Life, Explaining Emergence". Disponible en: <http://www.nbi.dk/~emmeche/cePubl/97e.defLife.v3f.html>

Fawcett, D. (1926): "The Concept of Emergence", *Mind, New series*, 35 (139), pp. 408

Fontana, W., Shuster, P. (1998): "Continuity in Evolution: On the Nature of Transitions", *Science*, 280, pp. 1451-1455

Giere, R. (2004): "How Models Are Used to Represent Reality", *Philosophy of Science*, 71, pp. 742-752

Gleick, J. (1987): *Chaos: Making a New Science*, New York, Viking

Goodwin, B. (2000): "La Biología es una Danza", en J. Brockman (ed.), *La Tercera Cultura: Más allá de la Revolución Científica*, Barcelona, Tusquets, pp. 89-102

----- (1998): *Las Manchas del Leopardo: La Evolución de la Complejidad*, Barcelona, Tusquets

Gotshalk, D. W. (1942): "Causality and Emergence", *The Philosophical Review*, 51 (4), pp. 397-405

Gould, S. J., Eldredge, N. (1977): "Punctuated-Equilibria: The Tempo and Mode of Evolution Reconsidered", *Paleobiology*, 3, pp. 115-151

Hacking, I. (1979): "Imre Lakatos's Philosophy of Science", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 30 (4), pp. 381-402

----- (1992): "Style" for Historians and Philosophers", *Studies in the History and Philosophy of Science*, 23, pp. 1-17

----- (1987): "Was there a Probabilistic Revolution 1800-1930?", in L. Krüger, L.J. Daston, M. Heidelberger (eds.), *The Probabilistic Revolution vol. I*, Cambridge, MIT Press, pp. 45-55

- Haken, H. (1977): *Synergetics*, Berlin, Springer-Berlag
- Hayles, K. (1998): *La Evolución del Caos*, Barcelona, Gedisa
- Haynes, B. (1998): "The Invention of the Genetic Code", *American Scientist*, 86, pp. 8-14
- Henle, P. (1942): "The Status of Emergence", *The Journal Of Philosophy*, 39 (18), pp. 486-493
- Holland, J. H. (1996): *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*, Cambridge, MA, Perseus Books
- (1998): *Emergence: From Chaos to Order*, Oxford, Oxford University Press
- Hordijk, W., Steel, M. (2004): "Detecting Auto-Catalytic, Self-Sustaining Sets in Chemical Reaction Systems", *Journal of Theoretical Biology*, 227, pp. 451-461
- Humphrey, P. (1997a): "How Properties Emerge," *Philosophy of Science*, 64, pp. 1-17
- (1997b): "Emergence, Not Supervenience," *Philosophy of Science*, 64, pp. S337-S345
- Hut, P., Goodwin, B., Kauffman, S. A. (1997): "Complexity and Functionality: A Search for the Where, the When, and the How", *Proceedings of the International Conference on Complex Systems*, Nashua
- Jain, S., Krishna, S. (1999): "Emergence and Growth of Complex Networks in Adaptive Systems", *Computer Physics Communications*, 121-122, pp. 116-121
- Joyce, G. F. (1989): "RNA Evolution and the Origins of Life", *Nature*, 338, pp. 217-224
- (2002): "The Antiquity of RNA-Based Evolution", *Nature*, 418, pp. 214-221
- Kauffman, S. A. (2004): "The Ensemble Approach to Understand genetic Regulatory Networks" *Physica A*, 340, pp. 733-740
- (2000): *Investigations*, New York, Oxford University Press
- (1996a): *Investigations*, SFI, Working Paper. Disponible en: <<http://www.santafe.edu/sfi/People/kauffman/Investigations.html>>.
- (1996b): "Self-Replication: Even Peptides do it", *Science*, 382 (6591), pp. 496-497
- (1995): *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*, New York, Oxford University Press

----- (1993): *Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford, Oxford University Press

----- (1990): "The Science of Complexity and the "Origins of Order"", *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 2, pp. 299-322

----- (1982): "Filling Some Epistemological Gaps: New Patterns of Inference in Evolutionary Theory", *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1982-2, pp. 292-313

----- (1970): "Articulation of Parts Explanation in Biology and the Rational Search for Them", *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1970, pp. 257-272

Kim, J. (1999): "Making Sense of Emergence," *Philosophical Studies*, 95, pp. 3-36

----- (1987): "Strong" and "Global" Supervenience Revisited", *Philosophy and Phenomenological Research*, 48 (2), pp. 315-326

----- (1985): "Supervenience, Determination, and Reduction", *The Journal of Philosophy*, 82 (11), 1985, pp. 616-618

----- (1984): "Concepts of Supervenience", *Philosophy and Phenomenological Research*, 45 (2), pp. 153-176

----- (1978): "Supervenience and Nomological Incommensurables", *American Philosophical Quarterly*, 15, pp. 149-156

Kellert, S. H. (1992): "A Philosophical Evaluation of the Chaos Theory "Revolution"", *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1992 (2), pp. 33-49

Klee, R. (1984): "Micro-Determinism and Concepts of Emergence," *Philosophy of Science*, 51, pp. 44-63

Knyazeva, H. (1998): "What is Synergetics", *Indian Science Cruiser*, 12, pp. 17-23

Krishna, S. (2003): *Formation and Destruction of Auto-Catalytic Sets in and Evolving Network Model*, A Doctoral Unpublished Thesis, Center for Theoretical Studies, Indian Institute of Science. Disponible en: <<http://www.arxiv.org/list/nlin/0403>>

Koperski, J. (2001): "Has chaos been explained?", *British Journal in Philosophy of Science*, 52, pp. 683-700

Kuhn, T.S. (1963): *The Structure Of Scientific Revolutions*, Chicago, University of Chicago Press

----- (1970): “Notes on Lakatos”, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1970, pp. 137-146

Lahava, N., Nira, S., Elitzurb, A. C. (2001): “The Emergence of Life”, *Progress in Biophysics & Molecular Biology*, 75, pp. 75-120

Lakatos, I. (1970a): “History of Science and its Rational Reconstructions”, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1970, pp. 91-136

----- (1970b): “Replies to Critics”, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1970, pp. 174-182

----- (1983): *La metodología de los Programas de Investigación Científica*, Madrid, Alianza

Laubichler, M. D., Wagner, P. G. (2001): “How Molecular is Molecular Developmental Biology? A Reply to Alex Rosenberg’s Reductionism Redux: Computing the Embryo”, *Biology and Philosophy*, 16, pp. 53-68

Lee, D. H., Granja, J. R., Martínez, J. A., Severin, K., Ghadiri, M. R. (1996): “A Self-Replicating Peptide”, *Science*, 382 (6591), pp. 525-528

Lee, D. H., Severin, K., Yokobayashi, Y., Ghadiri, M. R. (1997): “Emergence of Symbiosis in Peptide Self-Replication Through a Hypercyclic Network”, *Science*, 390 (6660), pp. 591-594

Levin, S. (2002): “Complex adaptive Systems: “Exploring the Known, the Unknown, and the Unknowable”, *Bulletin of the American Mathematical Society*, 40 (1), pp. 3-19

Lewes, G. H. (1875). *Problems of Life and Mind*, vol. 2, London, Kegan Paul, Trench, Turbner, and Co.

Lewontin, R. (1993): *The Doctrine of DNA*, Penguin Books

Leydesdorff, L. (2002): “The complex Dynamics of Technological Innovation: A Comparison of Models Using Cellular Automata”, *Systems Research an Behavioral Science*, 19, pp.563-575

Lloyd, A. H. (1927): “Also the Emergence of Matter”, *The Journal of Philosophy*, 24 (12), pp. 309-332

Malisoff, W. M. (1939): "Emergence without Mystery", *Philosophy of Science*, 6 (1), pp. 17-24.

----- (1941): "Chemistry: Emergence without Mystification", *Philosophy of Science*, 8 (1), pp. 39-52

Margullis, L. (2000): "Gaia es una Pícara Tenaz", en J. Brockman (ed.), *La Tercera Cultura: Más allá de la Revolución Científica*, Barcelona, Tusquets, pp. 120-142

Maturana, H., Varela, F. (1980): *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Dordrecht: D. Reidel

Maturana, H. (1988): "Ontology of observing: The biological foundations of self consciousness and the physical domain of existence", in Donaldson, R. (Ed.), *Texts in Cybernetic Theory: An In- Depth Exploration of the Thought of Humberto Maturana, William T. Powers, and Ernst von Glasersfeld*, Felton CA: American Society for Cybernetics [conference workbook]

McClendon, J. H. (1999): "The Origin of Life", *Earth ScienceReviews*, 47, pp. 71-93

McKelvey, B. (1999): "Avoiding Complexity Catastrophe in Coevolutionary Pockets: Strategies for Rugged Landscapes", *Organization Science*, 10 (3), 294-321

McLaughlin, B. (1992): "The Rise and Fall of British Emergentism", in A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim (eds.), *Emergence or Reduction? Essays on the Prospects of Nonreductive Physicalism*, Walter de Gruyter, Berlin, New York, pp. 49-93

----- (1997): "Supervenience, Vagueness, and Determination", (*Noûs Philosophical Perspectives*, 11, *Mind, Causation, and World*, 31, pp. 209-230

Meehl, P. E., Sellars, W. (1956): "The Concept of Emergence", in H. Feigl (eds.), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Volume I: The Foundations of Science and the Concepts of Psychology and Psychoanalysis*, University of Minnesota Press, pp. 239-252.

Mill, J. S. (1843): *System of Logic*, London, Longmans, Green, Reader, and Dyer. [8th ed., 1872]

Mitsuzawa, S., Watanabe, S. (2001): "Continuous Growth of Auto-Catalytic Sets", *BioSystems*, 59, pp. 61-69

Monod, J. (1981): *El Azar y la Necesidad*, Barcelona, Tusquets

Morgan, C. L. (1923): *Emergent Evolution*, London, Williams and Norgate

Nason, A. (1968): *Biología*, México, Limusa

O'Connor, T. (2000): "Causality, Mind and Free Will," *Philosophical Perspectives*, 14, pp. 105-117

----- (1994): "Emergent Properties," *American Philosophical Quarterly*, 31, pp. 91-104

O'Connor, T., Wong, H. Y. (Por aparecer): "The Metaphysics of Emergence", *Noûs*, Forthcoming. Disponible en: <<http://opp.weatherson.net/archives/001532.html>>

----- (2002): "Emergent Properties", in Edward N. Zalta (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Winter 2002 Edition. URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/win2002/entries/properties-emergent/>>

Ortega, J. (2000): *¿Qué Es Filosofía?*, México, Espasa Calpe

Pap, A. (1952): "The Concept of Absolute Emergence", *The British Journal for the Philosophy of Science*, 2 (8), pp. 302-311

Pepper, S. (1926): "Emergence," *Journal of Philosophy*, 23 (9), pp.241-245

Prigogine, I. (1998): *El Nacimiento del Tiempo*, Barcelona, Tusquets

----- (1997): *¿Tan Sólo una Ilusión?: Una Exploración del Caos al Orden*, Barcelona, Tusquets

----- (1962): *Non-Equilibrium Statistical Mechanics*, New York, John Wiley and Sons

Prigogine, I., Nicolis, G. (1977): *Self-Organization In Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*, New York, John Wiley and Sons

Purthill, R. L. (1967): "Kuhn on Scientific Revolutions", *Philosophy of Science*, 34-1, pp. 53-58.

Rasmussen, S., Chen, L., Deamer, D., Krakauer, D., Packard, N.H., Stadler, P. F., Bedau, M. (2004): "Transitions from Nonliving to Living Matter", *Science*, 303 (5660), pp. 963-965

Reiser, O. L. (1926): "Probability, Natural Law, and Emergence: I. Probability and Purpose", *The Journal of Philosophy*, 23 (16), pp. 421-435

Richardson, R. C. (2001): "Complexity, Self-organization and Selection", *Biology and Philosophy*, 16, pp. 655-683

Rorty, R. (1996): *Objetividad, Relativismo y Verdad: Escritos filosóficos I*, Barcelona, Paidós

----- (1983): *La filosofía y el Espejo de la Naturaleza*, Madrid, Cátedra

Rosenberg, A. (1997): "Reductionism Redux: Computing the Embryo", *Biology and Philosophy*, 12, pp. 445-470

----- (2001): "Reductionism in a Historical Science", *Philosophy of Science*, 68 (2), pp. 135-163

Rosenberg, A., Kaplan, D.M. (Por aparecer): "How to Reconcile Physicalism and Antireductionism about Biology", *Philosophy of Science*

Rossler, O. E. (1971): "A System Theoretic Model of Biogenesis", *Z. Naturforschung*, 26b, pp. 741-746

Searle, J. (1992): *The Rediscovery of the Mind*. Cambridge, MA, MIT Press

Sperry, R. W. (1991): "In Defense of Mentalism and Emergent Interaction", *The Journal of Mind and Behavior*, 12 (2), pp. 221-246

----- (1986): "Macro- Versus Micro-Determinism", *Philosophy of Science*, 53(2), pp. 265-270

----- (1969): "A Modified Concept of Consciousness", *Psychological Review*, 76, pp. 532-536

Sterelny, K. (2000): "Development, Evolution, and Adaptation", *Philosophy of Science*, 67, pp. S369-S387.

Silberstein, M., McGeever, J. (1999): "The Search for Ontological Emergence", *The Philosophical Quarterly*, 49 (195), pp. 182-200

Smith, T. S., Stevens, G. T. (1996): "Emergence, Self-Organization, and Social Interaction: Arousal-Dependent Structure in Social Systems", *Sociological Theory*, 14 (2), 1996, pp. 131-153.

Sole, R. V., Manrubla, S. C., Benton, M., Kauffman, S., Bak, P. (1999): "Criticality and Scaling and Evolutionary Ecology", *Tree*, 14 (4), pp. 156-160

Sprott, J. C. (1995): *Strange Attractors*, USA, M&T books

Stacey, R. Shaw, P., Griffin, D. (2000): *Complexity and Management: Fad or Radical Challenge to Systems Thinking*, Routledge

Stephan, A. (2002): "Emergentism, Irreducibility, and Downward Causation", *Grazer Philosophische Studien*, 65, pp. 77-93

----- (1999): “Varieties of Emergentism”, *Evolution and Cognition*, 5 (1), pp. 49-59

----- (1997): “Armchair Arguments Against Emergentism”, *Erkenntnis*, 46 (3), pp. 305-314.

Suárez, M. (2004): “An Inferential Conception of Scientific Representation”, *Philosophy of Science*, 71, pp. 767-780

Trevor, J., T. (2003): “Possible Origen of a Membrane in the Subsurface of the Earth”, *Cell Biology International*, 27, pp. 451-457

Varela, F. (2000): “Orden Gratuito” (comentario sobre S. Kauffman), en J. Brokcmán (ed.), *La Tercera Cultura: Más allá de la Revolución Científica*, Barcelona, Tusquets

Varela, F. (1979): *Principles of Biological Autonomy*, New York: Elsevier (North-Holland)

Wachtershauser, G. (2000): “Life as We Don't Know It”, *Science*, 289 (5483), pp. 1307-1308.

Watson, J. D. (1962): “The Involvement of RNA in the Synthesis of Proteins”, Nobel Lecture, December 11, pp. 785- 808

Watson, J. D., Crick, F. H. (1953): “Molecular Structure of Nucleic Acids. A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid”, *Nature*, 171, pp. 737-738

Weber, B.F. (1998): “Origins of Order in Dynamical Models”, *Biology and Philosophy*, 13, pp. 133-144

----- (1999): “Irreducible Complexity and the Problem of Biochemical Emergence”, *Biology and Philosophy*, 14, pp. 593-605

Weber, B.F., Depew, D.J. (1996): “Natural Selection and Self-Organization”, *Biology and Philosophy*, 11, pp.33-65

Wimsatt, W. C. (2002): “Emergence as Non-Aggregativity and the Biases of Reductionism”, Forthcoming in *Re-Engineering Philosophy for Limited Beings: Piecewise Approximations to Reality*, Cambridge, Harvard University Press

----- (1997): “Aggregativity: Reductive Heuristics for Finding Emergence”, *Philosophy of Science*, 64 (2), pp. S372-S384

----- (1995): “The Ontology of Complex Systems,” *Canadian Journal of Philosophy*, 20, pp. 564-590

----- (1974): “Reductive Explanation: A Functional Account”, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1974, pp. 671-710

----- (1972): “Complexity and Organization”, in K. F. Schaffner, R. S. Cohen (eds.), *Boston Studies in the Philosophy of Science*, Dordrecht, Reidel, 20, pp. 67-86

Wolfram, S. (2002): *A New Kind of Science*, Wolfram Media

Wright, S. (1931): “Evolution in Mendelian Populations”, *Genetics*, 16, 1931, pp. 97-159. Reprinted in William B. Provine: *Sewall Wright: Evolution: Selected Papers*, Chicago, University of Chicago Press, pp. 98-160

----- (1932): “The Roles of Mutation, Inbreeding, Crossbreeding and Selection in Evolution”, *Proceedings of the Sixth Annual Congress of Genetics*, 1, pp. 356-366. Reprinted in William B. Provine: *Sewall Wright: Evolution: Selected Papers*, Chicago, University of Chicago Press, 1986, pp. 161-177

Yao, S., Ghosh, I., Zutshi, R., Chmielewski, J. (1998): “Selective Amplification by Auto- and-Cross-Catalysis in a Replicating Peptide System”, *Nature*, 396, pp. 447-450