Carlos Eduardo Maldonado · Nelson Alfonso Gómez Cruz

El Mundo de las Ciencias de la Complejidad

Una investigación sobre qué son, su desarrollo y sus posibilidades

Carlos Eduardo Maldonado
Profesor Titular
Universidad del Rosario

Nelson Alfonso Gómez Cruz
Asesor en Modelamiento y Simulación Empresarial
Laboratorio de Modelamiento y Simulación
Universidad del Rosario

Contenido

Introducción

PRIMERA PARTE

1. Origen y naturaleza de las ciencias de la complejidad: pensando la metamorfosis de la ciencia

2. El problema más difícil: criterios de demarcación de/para la complejidad

2.1. La distinción entre complejidad y pensamiento sistémico

2.2. La distinción entre ciencias de la complejidad y pensamiento complejo

2.3. La distinción entre ciencias de la complejidad y cibernética

2.4. Recapitulando

SEGUNDA PARTE

3. Ciencias de la Complejidad

3.1. Libros de recuentos periodísticos acerca de ciencias de la complejidad

3.2. Artículos clásicos o fundacionales sobre complejidad y ciencias de la complejidad

3.3. Textos panorámicos, clásicos e introductorios sobre complejidad

3.3.1. Bibliografía en español

3.3.2. Bibliografía en inglés

3.4. Textos técnicos sobre diversos aspectos de la complejidad

3.5. Estado actual de las ciencias de la complejidad

3.5.1. Complejidad y termodinámica del no equilibrio

3.5.2. Complejidad y caos

3.5.3. Complejidad y fractales

3.5.4. Complejidad y catástrofes

3.5.5. Complejidad y redes

3.5.6. Complejidad y lógicas no-clásicas

3.6. Emergencia y auto-organización

3.7. Complejidad y sistemas cuánticos

3.8. Modelamiento y simulación de sistemas complejos

4. Complejidad y sistemas vivos

4.1. Modelamiento y simulación de sistemas biológicos, sistemas inspirados biológicamente y vida artificial

5. Complejidad y Ciencias Sociales

5.1. Bibliografía general sobre complejidad y ciencias sociales y humanas

5.2. Complejidad y sociología

5.3. Complejidad y antropología

5.4. Complejidad y filosofía

5.5. Complejidad e historia

5.6. Complejidad, administración y organizaciones sociales

5.6.1. Complejidad, economía y finanzas

5.6.2. Consultoría empresarial en el marco de las ciencias de la complejidad

5.7. Complejidad y psicología

5.8. Complejidad y estudios culturales

6. Ingeniería de Sistemas Complejos

6.1. Metaheurísticas (híbridas, paralelas, hiperheurísticas), optimización y resolución de problemas

6.2. Sistemas computacionales naturales, inteligentes y biológicos

6.2.1. Computación suave

6.2.2. Inteligencia computacional

6.2.3. Computación natural

6.3. Computación evolutiva o algoritmos evolutivos

6.4. Inteligencia colectiva o teoría de enjambres

6.5. Computación con membranas o sistemas P

6.6. Computación inmune o sistemas inmunes artificiales

6.7. Complejidad, sistemas bio-Inspirados, bio-robótica y bio-hardware

7 Complejidad, información y computación

7.1. Complejidad computacional, teoría de la computación problemas P y NP

7.2. Nuevos modelos de computación, nuevos paradigmas de programación, computación no estándar, computación no convencional e hipercomputación

7.3. Teoría algorítmica de la información

8 Complejidad en otros campos

8.1. Complejidad y educación

8.2 Complejidad y religión

8.3. Complejidad y sistemas militares

8.4. Complejidad, arte y estética

8.5. Complejidad y medicina

9. Complejidad en Colombia

9.1. Principales textos sobre complejidad en el país

10. Centros de investigación, revistas, series de libros y eventos

10.1. Principales centros de investigación sobre complejidad en el mundo

10.2. Revistas especializadas sobre complejidad

10.2.1. Otras revistas relacionadas con complejidad

10.3. Series de libros sobre complejidad

10.4. Eventos sobre complejidad y campos afines

10.4.1. Vida artificial

10.4.2. Computación evolutiva, hardware evolutivo y robótica evolutiva

10.4.3. Inteligencia de enjambres

10.4.4. Sistemas inmunes artificiales

10.4.5. Autómatas celulares

10.4.6. Computación molecular

10.4.7. Computación natural

10.4.8. Inteligencia computacional
10.4.9. Sistemas bio-inspirados
10.4.10 Modelamiento, simulación y agentes
10.4.11 Computación no convencional
10.4.12 Bioinformática
10.5. Sociedades sobre complejidad

Postfacio

Introducción

La situación es verdaderamente apasionante. Mientras que en el mundo llamado real –y entonces se hace referencia a dominios como la política, la economía, los conflictos militares y sociales, por ejemplo-, la percepción natural –digamos: de los medios y la opinión pública- es que el país y el mundo se encuentran en condiciones difíciles; en algunos casos, dramática; y en muchas ocasiones trágica, en el campo del progreso del conocimiento asistimos a una magnífica vitalidad. Esta vitalidad se expresa en la ciencia de punta y, notablemente, en las *ciencias de la complejidad*.

Mientras que la ciencia normal –para volver a la expresión de Kuhn- se encuentra literalmente a la defensiva en numerosos campos, temas y problemas –digamos, a la defensiva con respecto al decurso de los acontecimientos y a las dinámicas del mundo contemporáneo-, en el contexto del estudio de los sistemas complejos adaptativos asistimos a una vitalidad que es prácticamente desconocida para la corriente principal de académicos –independientemente de los niveles en los que trabajan-, de científicos, de administradores de educación y de ciencia y tecnología (por ejemplo rectores, vicerrectores, decanos, directores de departamentos, tomadores de decisión, políticos y gobernantes). La corriente principal del conocimiento (*mainstream*) desconoce una circunstancia, un proceso, una dinámica que sí es conocida por parte de quienes trabajan e investigan activamente en el campo de las ciencias de la complejidad.

Nos encontramos, más que ante un continente inexplorado, con toda seguridad, ante un mundo perfectamente nuevo. El estudio de los sistemas, fenómenos y comportamientos caracterizados por complejidad creciente, no-linealidad, emergencias, autoorganización, turbulencias, fluctuaciones e incertidumbre, entre otros rasgos distintivos, está lejos de ser una tierra prometida. No hubo nunca una promesa al respecto; mucho menos una revelación. Por el contrario, se trata de un auténtico esfuerzo de creación en el que participan activamente y de consuno la razón y la imaginación, la pasión y el rigor y que convoca a un número creciente de científicos, tecnólogos, filósofos, artistas, ingenieros, e incluso hombres de empresa y militares al mismo tiempo que a educadores.

Las ciencias de la complejidad son el resultado de una creación –no siempre directa, consciente y deliberada, y que más bien incorpora también buenas coincidencias, la capacidad de ver relaciones y tipos de relaciones donde no las había, en fin, de innovación en toda la línea de la palabra.

Si es cierta la lectura de que la ciencia avanza no por vía acumulativa, sino, más bien, a través de rupturas y de discontinuidades, entonces las ciencias de la complejidad constituyen un verdadero y radical avance en la historia del conocimiento, en la historia misma de la vida. Aquella idea popularizada por Th. Kuhn, pero en cuya base se encuentran en realidad los trabajos de G. Bachelard, G. Canguilhem y A. Koyré y que ha sido retomada con un acento propio por parte de autores como M. Serres, sostiene que la historia de la ciencia es la historia misma de revoluciones; esto es, de luchas intestinas, de conflictos e intereses de poder, en fin, de bifurcaciones antes que de linealidades. Atrás queda la historia del conocimiento que forma parte del primer libro de cada obra de Aristóteles, o la historia leída à la Hegel o à la Husserl, por ejemplo, y que quiere ser leído como una especie de predicción retrospectiva cuya finalidad es la de poner en evidencia que la historia tenía que conducir hasta el momento actual, en cada caso.

Por el contrario, la noción de que la historia es ante todo una construcción no-lineal, no intencional y no teleológica empata perfectamente con el sentido mismo de la evolución. La evolución no sabe para dónde avanza; las especies no saben hacia dónde se dirigen. Lo mejor que podemos decir es que los sistemas vivos potencian en cada paso una mayor adaptabilidad (*fitness*) y, por consiguiente, mayor y mejor supervivencia. El conocimiento y la vida son una sola y misma cosa, y los avatares mismos de la vida son, plano por plano, punto por punto, los mismos avatares del conocimiento. En otras palabras, aquello que hace efectivamente posible a los sistemas vivos no es otra cosa que su capacidad de aprender, de olvidar, de heredar o transmitir lo aprendido, y de explorar, en cada instante, en cada lugar, espacios, posibilidades adyacentes.

Pues bien, las ciencias de la complejidad expresan el resultado de algunas de las mejores mentes humanas en los últimos tiempos por tratar de pensar, de explicar y de comprender, en fin, de hacer efectivamente posibles temas y problemas tales como: ¿es el Universo un sistema estable a largo plazo? ¿Podemos comprender la realidad de otra forma que como siempre lo hicimos, dado que hacia delante, los conocimientos alcanzados parecen ser limitados o insuficientes? ¿Por qué suceden las turbulencias, las fluctuaciones, las inestabilidades, y por qué razón el orden –en cualquier plano o contexto- se rompe y da lugar a nuevas formas, momentos y estructuras? ¿Cómo es posible que las cosas tiendan a hacerse cada vez más entreveradas, enredadas incluso, en fin, complejas? En síntesis: ¿qué es la complejidad y por qué las cosas son o se vuelven o se hacen complejas y acaso cada vez más y más complejas?

En interrogantes como los anteriores lo que salta inmediatamente ante la mirada reflexiva es la limitación –acaso la impotencia misma- ante las predicciones, ante las sorpresas, en fin, el descubrimiento de la incertidumbre.

Este libro quiere presentar, por primera vez en Colombia, por primera vez en América Latina y, por lo que conocemos, por primea vez en el mundo, un estado del arte acerca de las ciencias de la complejidad. Con él, podremos acercarnos, ya en profundidad, a lo que son, lo que significan y a los futuros –ciertamente muy promisorios del trabajo en complejidad.

En el contexto colombiano y latinoamericano se comenzó a hablar primero de pensamiento sistémico: enfoques sistémicos, estudios sistémicos y demás. Autores como von Foester, Forrester, von Bertalanffy, la escuela de Palo Alto y autores como G. Bateson, por ejemplo, y más recientemente F. Capra, y siempre H. Maturana, fueron motivos de referencias y de trabajo en contextos diferentes. Posteriormente, estrechamente relacionado con el anterior[1], el tema giró hacia complejidad: sistemas complejos, pensamiento complejo, enfoque(s) de complejidad, y otras expresiones similares se convirtieron en el foco de la atención en comunidades amplias como la académica, el sector público y el sector privado. La referencia, en este segundo caso, indudablemente, fue la obra de E. Morin –y sus epígonos-. De lejos, claramente, el pensamiento complejo es la vertiente más popular –sociológicamente hablando-. A esto ayuda el lenguaje –siempre encantador de E. Morin-, sus intuiciones y la buena difusión de su obra.

Sin embargo, en el panorama internacional, la ciencia de punta (*spearhead science, spearhead research*) se sitúa del lado de las ciencias de la complejidad. A decir verdad, el establecimiento (*the establishment*: esto es, el *statu quo*) ya ha cooptado –se ha apropiado, digamos-, de los enfoques sistémicos (incluyendo la cibernética de primer y de segundo orden), tanto como del pensamiento complejo. Pero el sistema real –la *Realpolitik*- no ha podido apropiarse aún –en estamentos como el sector privado, la educación, los sistemas militares, el sector eclesiástico en general-, de las ciencias de la complejidad.

Cuando hablamos de ciencias de la complejidad, no simplemente hablamos de sistemas, fenómenos o comportamientos complejos sino, más exactamente, de sistemas (fenómenos y/o comportamientos) de complejidad *creciente*. Como quiera que sea, el trabajo en complejidad es una circunstancia reciente pero sólida, fuerte, consistente, no obstante numerosas voces de escepticismo provenientes de ángulos distintos.

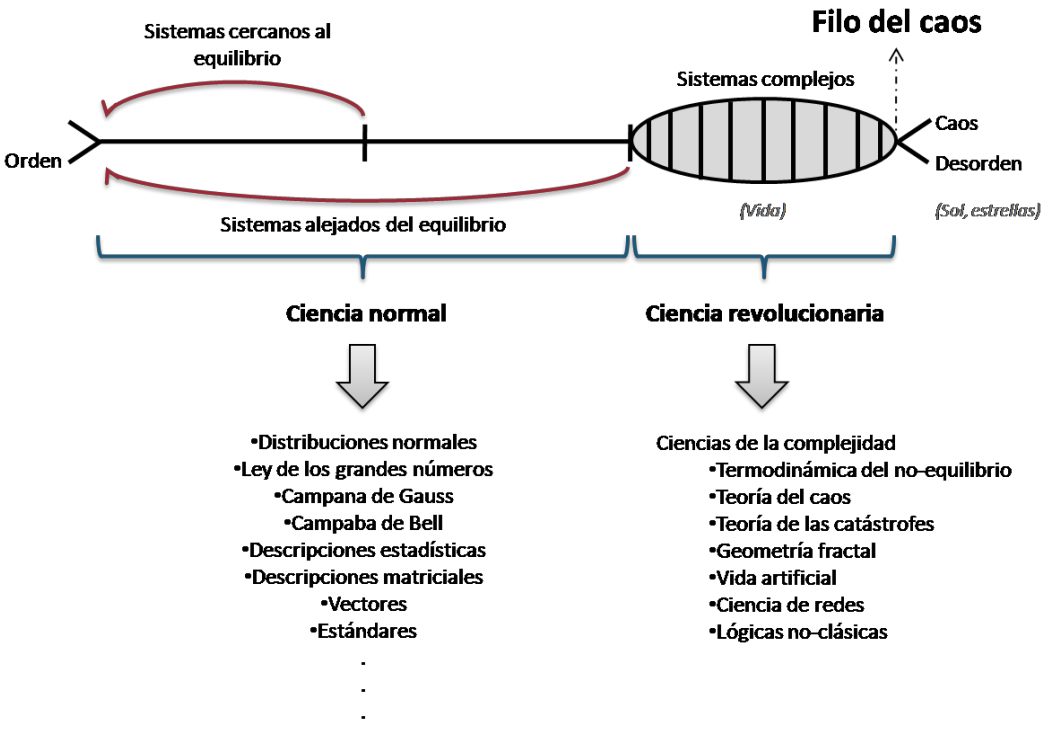
El esquema 1 ilustra el espacio de las ciencias de la complejidad relativamente a toda la ciencia normal. Como se aprecia, el espacio más amplio –literalmente: es decir, en términos geográficos, demográficos, financieros, administrativos y humanos, por ejemplo-, es el de la ciencia normal. Con este esquema sencillamente queremos poner de manifiesto que las ciencias de la complejidad no se ocupan de todas las cosas, de todos los fenómenos, sistemas y comportamientos. Como sabemos hace ya mucho rato, gracias a la filosofía de la ciencia, una teoría que lo explica todo no explica nada. (Tal es el caso, por ejemplo, de la numerología, de la astrología y demás).

La comunidad, académica y científica, de complejólogos no nos interesamos por todos los aspectos y dimensiones de la realidad. Tan sólo por aquellos ámbitos en donde suceden imprecisiones, vacíos, incertidumbre, no-linealidad, sorpresas, emergencias, ausencia de control local, bifurcaciones, inestabilidades, fluctuaciones y cascadas de fallas; para mencionar tan sólo algunas de las características de los sistemas complejos.

Como quiera que sea, organizativa, institucionalmente, la historia de la complejidad es bastante reciente. Los primeros institutos se crean a finales de los años 1970s: en 1978, el Centro de Estudios para la Dinámica No-Lineal en el Instituto La Jolla; a comienzos de los

[1] Hemos trabajado estas relaciones en Maldonado, C. E., (2001).

años 1980 se crea el Instituto Santa Cruz para la Ciencia No-Lineal, que nace a partir del Colectivo de Caos de Santa Cruz; en el año 1980 surge el Centro para Estudios No-Lineales en el Laboratorio Nacional de los Álamos; posteriormente, en 1981 se crea el Instituto para la Ciencia No-Lineal en la Universidad de California en Davis.



Esquema 1. El espacio de las ciencias de la complejidad en contraste con la ciencia normal. Esquema realizado por los autores.

Finalmente, en 1984 surge el más famoso de todos los Centros e Institutos: el Instituto Santa Fe (SFI, por sus siglas en inglés). Ampliando significativamente la comprensión del tipo de ciencia que hacían los anteriores Centros e Institutos, el SFI está consagrado a las Ciencias de la Complejidad. Nacen, organizativa-administrativa-financieramente, las Ciencias de la Complejidad. La historia del SFI está muy bien y hermosamente narrada en el libro, clásico, de Waldrop. Posteriormente, en Estados Unidos y en Europa primero, y luego también en Japón y la China, surgen otros centros e institutos similares.

Como se apreciada sin dificultad, si tomamos como punto de referencia el SFI, hasta la fecha llevamos alrededor de treinta años trabajando activa, sistemáticamente en complejidad. Es un tiempo breve a escala humana, y aún más en perspectiva histórica. Sin embargo, los logros, los ritmos de desarrollo, los progresos son impresionantes y crecientes. Este libro brinda una mirada sobre estos progresos.

Asistimos, manifiestamente, a una revolución. Para decirlo cognitivamente en términos de T. Kuhn: se trata de una revolución científica: en el plano teórico y tecnológico al mismo tiempo. Muchos, muchos de nosotros adoptamos –análogamente a lo que sucede en política-, una posición determinada y estamos sin saberlo y sabiéndolo, en el campo

equivocado de la revolución, o acaso también, inversamente, en el campo acertado de la revolución. (Algo así es lo que expresa T. Kuhn en el capítulo 10 de su obra fundamental: *Estructura de las revoluciones científicas*).

Siempre sucede en las revoluciones: la carga de la demostración de la novedad siempre recae sobre quien propone una alternativa, sobre quien abre una nueva puerta, sobre quien avizora un horizonte. Las ciencias de la complejidad son un territorio novedoso, la literatura al respecto es creciente, vertiginosa incluso. Los eventos internacionales, las colecciones de libros, las revistas, los títulos. Y sin embargo, es claro, aun se encuentra lejos –bastante lejos, para ser honestos- de convertirse en un conocimiento normalizado. Aun es, para emplear la famosa expresión, "nuevo paradigma"; falta bastante para que se convierta en el "paradigma vigente".

La comunidad de profesores, investigadores y estudiosos e interesados por la complejidad en general es creciente. Sin embargo, todos son complejólogos de primera generación. Es decir, gente que se ha formado en una disciplina, en una ciencia articular, y que, por diversas razones, al cabo, ha accedido a pensar, a trabajar y a vivir en términos de interdisciplinariedad: inter trans o multidisciplinariedad: para el caso da lo mismo. Es decir, de conocimientos transversales, cruzados, integrales, marginales a veces, tangenciales, transversales – y de más metáforas, extraídas habitualmente de la geometría.

Estamos aún en deuda, generacionalmente, con el presente y con el futuro: no existen aún complejólogos de segunda generación. Que serán todos aquellos que se hayan formado-es decir, en, desde pregrado- en ciencias de la complejidad. Previsiblemente, en el futuro inmediato seguiremos siendo, todos, complejólogos de primera generación hasta tanto no se creen currículos, carreras y programas académicos en complejidad. He aquí un reto formidable, por ejemplo, para las facultades de educación. A lo sumo, asistimos, en Colombia y en el mundo, a la presencia de materias (cursos, seminarios, etc.) de complejidad, con mayor o menor intensidad y transversalidad. Pero no aún asistimos a la creación de currículos de pregrado y postgrado enteramente dedicados al trabajo, formación e investigación en ciencias de la complejidad.

***

El libro presenta la bibliografía, los principales centros de investigación, revistas, links, aplicaciones y campos de trabajo que conocemos (y en algunos casos, que tenemos en nuestras casas y bibliotecas personales). Desde luego que toda lista siempre es incompleta. Sencillamente queremos brindar el más completo panorama acerca del estado del trabajo en ciencias de la complejidad.

Dos precisiones se hacen necesarias en este punto. En primer lugar, por razones obvias de espacio, fue necesario dejar de lado las referencias a los artículos científicos y de divulgación sobre complejidad (que ascienden a millones), para concentramos solo en los principales libros relativos a cada tema abordado. Frente a esta limitación, que es en realidad mayor, fue imposible no incluir una sección exclusiva para presentar los artículos clásicos y fundacionales sobre complejidad (sección 3.2). También se incluyeron algunos pocos artículos clave en diversas secciones a lo largo del texto. De otro lado, pese a que se

trato de evitar tanto como fue posible, algunos textos fueron categorizados en más de una sección de acuerdo con sus características específicas, pues apuntan transversal y sistemáticamente a más de un tema o problema a la vez.

Cada sección va introducida por un breve comentario de tipo al mismo tiempo teórico y metodológico. Adicionalmente, hemos creado varios esquemas o diagramas que suministran una visión sintética del tema introducido y, por consiguiente, de la bibliografía pertinente en este estado del arte.

1. Origen y naturaleza de las ciencias de la complejidad

Pensando la metamorfosis de la ciencia

La civilización occidental nació marcando una ruptura radical entre las civilizaciones anteriormente existentes y ella misma. No había ninguna solución de continuidad. El resto, hasta el día de hoy, es historia conocida.

Desde el punto de vista evolutivo esta postura es enteramente comprensible. Es análoga a situaciones estudiadas por ciencias y disciplinas como la antropología cultural, la psicología clínica o la del desarrollo, la pedagogía o la sociología: determinadas personas, ciertos grupos, incluso culturas o sociedades determinadas requieren, adoptan, en determinadas circunstancias –por ejemplo, en condiciones de peligro, como reacciones de defensa, en situaciones de debilidad, y otras semejantes-, posturas radicales, críticas, extremas. Occidente provenía de sólidas civilizaciones (no simplemente culturas) y lo sabía. Uno de los ejemplos que ilustran esto es el reconocimiento, la deuda y la herencia grande de los griegos –la Grecia arcaica- para con los egipcios. Para no mencionar el temor que Persia (ya en decadencia) despertaba ante el mundo griego. O lo admiración que siempre, antes, entonces y después le produjo la India.

Una de las ideas fundacionales de la humanidad Occidental es la creencia de que existen conocimientos mejores que otros. Mejor aún: que existe –con fundamento en la realidad o bien por razones epistémicas- unos conocimientos mejores que otros. En la Grecia clásica era la geometría, en la Edad Media era la teología, en la modernidad era la física (o el aparato físico-matemático).

Sin ninguna dificultad, la representación del conocimiento en toda la historia de Occidente es eminentemente piramidal. En consecuencia, el proceso de "avance" desde la base hasta la cima de la pirámide consiste en la historia de especialización en el conocimiento. Esta situación se expresa muy bien en los aparatos educativos de la historia de Occidente, desde La Academia y el Liceo hasta la Stoa, desde la Universitas hasta el día de hoy (cuando se habla, eufemística o bien intencionadamente de la "Universidad de tercera generación").

Pues bien, la historia del conocimiento en Occidente puede decirse que, en el estado normal, es la historia mediante la cual cada vez sabemos más de algo (específico o

particular) y menos de todo. Los mecanismos normales (= normalizantes y normalizados) de la educación, la gestión del conocimiento y las políticas sobre conocimiento –en cualquier acepción de la palabra-.

Sin embargo, este panorama, presentado aquí sucintamente, no es absoluto. Al mismo tiempo que esta es la situación normal, generalizada, en diversos momentos han surgido diversos esfuerzos por lograr síntesis, por aproximar lo diverso, por integrar conocimientos, disciplinas, ciencias, saberes, tradiciones, experiencias distintas. Uno de los más recientes intentos por llevar a cabo una síntesis de conocimientos tuvo lugar en plena Guerra Fría, alrededor de los años 1960s. Nos referimos a la epistemología. Los nombres que llevan a cabo este esfuerzo incluyen autores como G. Bachelard, J. Piaget, y otros.

La epistemología –algo de lo cual muy poco se habla y existe hoy en día en los principales escenarios científicos y académicos en el mundo- trató de ser una "teoría general del conocimiento" cuya finalidad era al mismo tiempo, de un lado, trazar las precisiones entre lo que es o era "ciencia", "disciplina", "saber" y "práctica" y lo que no lo era (o es). Como quiera que sea, la epistemología desaparece, muere. Aunque su espíritu permanece, por así decirlo. El espíritu de la epistemología se mantiene en la filosofía de la ciencia. De este modo, la teoría general del conocimiento desaparece y da lugar a la historia y filosofía de la ciencia. La razón es que muy pronto la ciencia y la filosofía, en general, se dieron cuenta que no era posible –que no tenía sentido- una teoría general del conocimiento dado que había que atender a la historia propia, a las prácticas, a las metodologías y a las experiencias de cada ciencia y disciplina, por ejemplo. La filosofía de la ciencia, sin embargo, permanece –incluso hasta el día de hoy- como una experiencia disciplinar; por ejemplo, filosofía de las matemáticas, filosofía de la biología, filosofía de la tecnología, y demás.

Sin embargo, hay una experiencia aún más importante de inter, trans y multidisciplinariedad. Se trata, precisamente, de las ciencias de la complejidad.

Las ciencias de la complejidad tienen un doble origen. De un lado, en el plano teórico, sus orígenes se remontan al descubrimiento del cálculo infinitesimal por parte de Newton y Leibniz, dado que el cálculo consiste en el primer abordaje científico, lógico y filosófico del más apasionante de todos los problemas: el estudio del movimiento; esto es, el estudio de los sistemas dinámicos.

La diferencia estriba en que el tema que se anuncia con el cálculo infinitesimal –cálculo diferencial y cálculo integral- es propiamente el estudio de un tipo particular de movimiento que jamás había sido considerado con seriedad por Occidente: no ya el movimiento regular, periódico, cíclico, controlado –que es el objeto, a su manera, del mundo griego, y definitivamente del mundo moderno con la mecánica clásica-, sino, el movimiento impredecible, irregular, variable[2]. Literalmente, el cálculo inventa, descubre el

[2] La única excepción a la consideración del movimiento de tipo regular, cíclico y periódico es, indudablemente, Heráclito; y en un segundo plano Demócrito y Epicuro. Lo que sucede es que Heráclito jamás ocupará un papel principal en toda la historia de Occidente –debido fundamentalmente a Platón y a Aristóteles y a toda la tradición que se deriva de ambos-. Por su parte, Demócrito y Epicuro jamás ocuparán un papel protagónico en la historia de Occidente, ni siquiera cuando Marx les dedica un espacio en su tesis doctoral. Habrá que esperar a la segunda mitad del siglo XX para que Heráclito –definitivamente gracias a y a partir de I. Prigogine- y Demócrito y Epicuro, con el estudio de la física atómica y cuántica puedan recuperar de nuevo la voz.

movimiento aperiódico y no-cíclico. Pero no puede *hacer* nada con él[3]. Habrá que esperar al descubrimiento del caos en el marco de la meteorología gracias a E. Lorenz.

A partir de Newton y Leibniz, posteriormente, en el giro del siglo XIX al XX, H.Poincaré sienta las bases para lo que más adelante será el estudio de fenómenos, sistemas y comportamientos caóticos gracias a la conclusión a la que arriba a un reto planteado por el rey Oscar II de Suecia. Esa historia ha sido narrada numerosas veces[4].

Simultáneamente, D. Hilbert presenta en el famoso segundo congreso mundial de matemáticas en el año 1900 –que era a la sazón su respuesta al primer congreso y a las tesis de Poincaré, formuladas cuatro años antes[5]- los 23 problemas que "habrían de ocupar a los próximos cien años". Lo verdaderamente significativo aquí estriba en el hecho de que no bien Hilbert hubo formulado un programa de investigación –verdaderamente genial, para decir la verdad[6]- a cien años cuando unos lustros más tarde dos jóvenes lógicos echarán por tierra los pilares –si cabe la expresión- de los veintitrés problemas. Son ellos A. Turing y K. Gödel. Con Turing y con Gödel asistimos al segundo gran hito en el nacimiento de las ciencias de la complejidad.

En 1929, Gödel, entonces de veintitrés años, presenta su tesis de doctorado sobre el famoso teorema de incompletud, pero lo hace público en el congreso de matemáticas de Königsberd, el 7 se septiembre de 1930. Con su teorema, Gödel demuestra que toda la tradición occidental ha sido esencialmente tautológica. En contra de la tradición, Gödel sostiene que la verdad de un sistema se encuentra, si quiere dejar de ser tautológica, por fuera del sistema; en otras palabras, la verdad de un sistema no se define por el sistema mismo ni tampoco en referencia a los elementos y las relaciones que componen o que articulan el sistema. Hay verdades que no son demostrables; los sistemas verdaderos son intrínsecamente incompletos. Si un sistema quiere ser coherente entonces es incompleto, y si quiere ser completo entonces es inconsistente y, por tanto, tautológico.

---

[3] Para ello habrá que esperar a la invención del computador.

[4] ¿Es el sistema solar estable a largo plazo? Tal fue el reto planteado a los matemáticos y científicos por Oscar II en 1887. La respuesta de Poincaré fue genial: es imposible demostrar (con el aparato matemático disponible, con las bases técnicas y tecnológicas a la mano) que el sistema solar sea estable. Para ello, Poincaré se concentró en una simplificación del sistema solar a partir del estudio de las relaciones entre el sol, la tierra y la luna. En contraste marcado con la física newtoniana –que es, en rigor, física de dos cuerpos, siempre, en cada caso (lo cual se evidencia por la segunda ley de la gravitación universal: la ley de la acción y la reacción)-, Poincaré estudia un fenómeno magníficamente más complicado que nadie había considerado hasta la fecha. Esto se conocerá posteriormente como el estudio de los 3 cuerpos. Debe ser posible considerar simultáneamente las relaciones de tres cuerpos, y así subir hacia cuatro, cinco, seis y más cuerpos. Ulteriormente, el tema es conocido como el problema de los n-cuerpos –un tema de magnífica complejidad en toda la línea de la palabra.

Este es, en rigor, el panorama grueso; pues, por ejemplo, en el estudio en particular de los movimientos de cada uno de los tres cuerpos –el sol, la luna y la tierra- existen otros aspectos de mayor complejidad. Para mencionar sólo uno, se trata del estudio simultáneo de los movimientos de la tierra: traslación (365 días, 5 horas y 57 minutos, equivalente a 365,2422 días), rotación (23 h 56 minutos), precesión (25.767 años) y nutación (un bucle de 18,6 años), (sin mencionar el bamboleo de Chandler). Lo que se hace manifiesto, en cualquier caso, es que la vida misma es posible gracias al movimiento en general, y en el caso de la tierra, gracias a los 4 movimientos de la tierra (sin atender, por otra parte, a las ocho fases de la luna). En cuanto al sol, hace muy poco que hemos comenzado a estudiarlo y comprenderlo.

[5] Como es sabido, el debate entre Hilbert y Poincaré es la confrontación de dos tesis o escuelas en matemáticas: el intuicionismo (Poincaré, Brown) y el formalismo (Hilbert). Los 23 problemas de Hilbert obedecen al mismo tiempo a un intento por clausurar cualquier posibilidad del intuicionismo, y sentar, de manera definitiva, un proyecto que encuentra su antecedente más directo en *Los Elementos* de Euclides.

Hay que decir, por lo demás, que el debate Poincaré-Hilbert puede ser visto, como es efectivamente el caso, como una versión en el dominio de la lógica y de las matemáticas del debate Heráclito-Parménides, Platón-Aristóteles, San Agustin-Santo Tomás, Kant-Hegel, por ejemplo – *mutatis mutandi*.

[6] Cfr. J. J. Gray, *El reto de Hilbert. Los 23 problemas que desafiaron a la matemática*, Barcelona, Crítica, 2005.

Por su parte, en 1936, A. Turing, a los veinticinco años, publica *Los números computables, con una aplicación al Entscheidungsproblem*, que hace referencia a un problema muy específico de la lógica simbólica que nos permita establecer si, particularmente, las proposiciones de la aritmética son verdaderas o falsas. En otras palabras, Turing demuestra –con la ayuda de lo que se conocerá como la Máquina de Turing, que no existen algoritmos para determinados programas. Gracias a ello, los problemas de computación se dividen en dos grupos: en problemas decidibles y en problemas indecidibles (o también en lenguajes decidibles e indecidibles). Un problema indecidible es todo aquel para el cual no existe (por el momento) ningún algoritmo que nos permita establecer de antemano si dicho lenguaje es verdadero o falso. Computacionalmente se expresa así: si un lenguaje se detiene o no se detiene. En el caso de los lenguajes o problemas indecidibles lo que sencillamente queda hacer es echar a rodar el programa y observar. Y a medida que el programa corre vamos estableciendo la verdad (o falsedad) del mismo. De otra parte, un programa (o lenguaje, o problema) se dice que es decidible si existe un algoritmo que establece si el programa es verdadero o falso o, lo que es equivalente, si se detiene o no. En el caso de los programas, problemas o lenguajes indecidibles se dice que son incompresibles. En el caso de los programas decidibles se dice que son, entonces, compresibles.

Con Turing, los problemas de computación saltan al primer plano[7].

El tercer hito conducente al origen de las ciencias de la complejidad lo constituyen los trabajos de I. Prigogine que dan lugar al desarrollo de la termodinámica del no-equilibrio, sobre de los trabajos de su maestro Onsager. A fin de comprender el verdadero significado de la termodinámica del no-equilibrio, y por qué razón es la primera de las ciencias de la complejidad –es decir, aquella que inaugura oficialmente con partida de nacimiento- a las ciencias de la complejidad, se hace necesaria una consideración importante previa, aunque larga.

Digámoslo de manera directa: la complejidad es el tiempo, la complejidad es la obra del tiempo. Aparentemente, esta idea puede parecer trivial, pero una consideración más cuidadosa nos permite observar otra cosa.

I. Wallerstein sostiene[8] que las ciencias y disciplinas pueden ser comprendidas en función de la densidad o de la magnitud temporal que tienen. Así, hay, claramente, ciencias del pasado; por ejemplo, la historia, la paleontología, la arqueología, la paleobiología, y la biología evolutiva. De otra parte, hay ciencias o disciplinas del presente; por ejemplo, el derecho, la economía, la ingeniería convencional, la administración, la sociología, la política. Se trata, en este segundo caso, de todas aquellas ciencias y disciplinas que sencillamente descuentan el tiempo[9]. La racionalidad humana habitualmente descuenta el tiempo, de diversas maneras.

[7] Hay que decir que A. Turing es considerado el padre de los computadores, incluso antes de que se desarrollaran, notablemente, gracias a los trabajos de J. Von Neumann.
[8] I. Wallerstein, *Las incertidumbres del saber*, Barcelona, Ed. Gedisa, 2005.
[9] Acerca de las decisiones y el problema de que numerosas veces descuentan el tiempo y cómo lograr para que puedan incorporar dimensiones y escalas temporales, véase el estupendo libro de G. Loewenstein and J. Elster, *Choice over Time*, New York, Russell Sage Foundation, 1992.

A fin de comprender mejor este reconocimiento, es fundamental atender al hecho de que cuando un historiador como Wallerstein nos recuerda la importancia del tiempo no se hace simple y llanamente referencia a una entidad metafísica o al recuento de horas, días y meses, por ejemplo, sino, mejor y más radicalmente, se trata de la consideración del tiempo como larga duración (*longue durée*)[10], una idea que se remonta a Braudel.

Así pues, el tiempo mismo es la complejidad o la complejidad es el producto mismo del tiempo –lo cual quiere decir, inmediatamente, de entrada, que se consideran dinámicas temporales de larga duración, de gran envergadura, y no simplemente el tiempo en medidas o escalas breves y de poca profundidad.

Cuando la Academia de Ciencias le confiere, en 1977, a I. Pirigogine el premio nobel de química expresa que es debido a que este autor introdujo en las ciencias lo que las ciencias no tenían: tiempo, historia. Así, el gran mérito de la termodinámica del no-equilibrio estriba exactamente en que introduce el tiempo como el factor mismo o la razón misma de la complejidad y/o de la complejización del mundo, de la sociedad, de la naturaleza.

Aquí se impone, sin embargo, una consideración cuidadosa. En rigor, el nudo grueso de lo que es complejidad, de lo que caracteriza a las ciencias de la complejidad consiste en el abordaje, el estudio y las resoluciones entre dos flechas del tiempo diametralmente opuestas: de un lado, la flecha de la termodinámica, y de otra parte la flecha de la biología.

La termodinámica es una ciencia de suma importancia que tarda prácticamente cien años en nacer y que encuentra en Fourier, Carnot, Bolztmann y Lord Thmpson (Kelvin) los cuatro ejes fundamentales de referencia. De las tres leyes o principios de la termodinámica (clásica), en el contexto de complejidad el más importante es, de lejos, el segundo principio, el de la entropía. De acuerdo con esta ley, nada ni nadie se escapa de la flecha del tiempo de la termodinámica, que conduce o que apunta, ulteriormente, hacia el equilibrio. El equilibrio, en el marco de la termodinámica consiste exactamente en la muerte; sencillamente, en el reposo, la ausencia de interacciones, de relaciones, de dinámicas. El experimento de Maxwell al respecto es bastante conocido y expresa adecuadamente la flecha de la entropía.

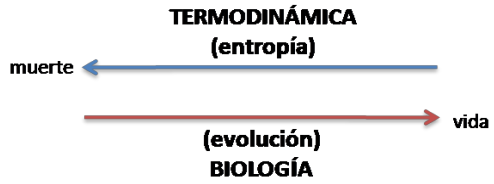
La segunda ley de la termodinámica fue formulada por L. Bolztamnn, y expresa, en realidad, la creencia más profunda y acendrada de toda la historia de la humanidad occidental con respecto al tiempo. Esta creencia tanto se expresa como que está fundamentada en las tres religiones monoteístas de Occidente: el judaísmo, el cristianismo (incluyendo el catolicismo, desde luego) y la religión musulmana. Para estas tres religiones, el tiempo es una maldición: el tiempo resta, agota, elimina. Precisamente por ello, en relación con ello, las cosas verdaderamente importantes y significativas suceden a pesar del tiempo, *después* del tiempo: en el paraíso, en la eternidad, en el cielo. Entre tanto, este mundo es un "valle de lágrimas"[11].

[10] Volveremos sobre este punto más adelante al considerar los problemas P versus NP y, por consiguiente, al considerar los tiempos polinomiales y los tiempos no polinomiales.
[11] Como resulta claro a una mirada reflexiva, esta creencia introduce una concepción sacrificial de la vida.

De otra parte, mientras la termodinámica se estaba desarrollando en el curso del siglo XIX, en otra ciencia perfectamente distinta, la biología, la situación era radicalmente distinta. Así, mientras que la termodinámica descubre y postula la flecha del tiempo que conduce al agotamiento, a la pérdida, al equilibrio y la muerte, de otra parte Ch. Darwin, específicamente en *El origen de las especies por medio de la selección natural* publicado en 1859 como resultado de sus estudios y de su viaje alrededor del mundo en el Beagle, sostiene que existe una flecha del tiempo –que es, justamente la evolución- y que ella tanto apunta hacia, como contiene, creación, proliferación, especiación, diversidad; en una palabra, vida. La genialidad de Darwin consistió en haber introducido el mecanismo, por así decirlo, que permite explicar a la biología, a la historia del planeta y, ulteriormente, también a la historia misma del cosmos. Este mecanismo es el de la selección – natural y, ulteriormente, cultural.

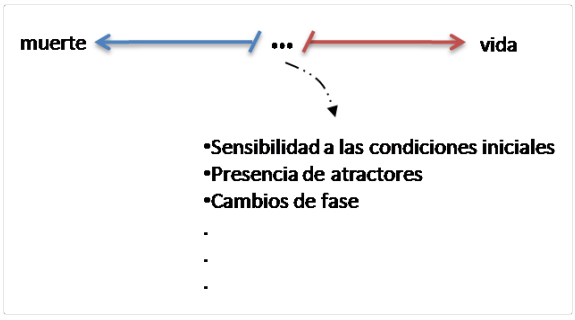
De esta suerte, la biología pone de manifiesto que el tiempo no implica, en manera alguna, erosión, pérdida, desgaste o muerte, sino, mejor aún, la creación o el aprovechamiento de oportunidades, la creación de posibilidades, diversificación, robustez y vida. El punto difícil estriba en el reconocimiento de que, tomada por sí misma, cada una de estas ciencias –la termodinámica y la biología- trabaja con una flecha del tiempo que es esencialmente irreversible. Lo que sucede es que nos encontramos entonces con dos flechas del tiempo irreversibles.

Así las cosas, tenemos, entonces dos flechas del tiempo diametralmente opuestas. El siguiente esquema (esquema 2) ilustra el problema fundamental de la complejidad:



Esquema 2. Fechas del tiempo diametralmente opuestas. Esquema realizado por los autores.

Es en este contexto exactamente en el que entra Prigogine y el desarrollo de la termodinámica hacia la termodinámica del no-equilibrio. Relativamente a la presentación que hacemos aquí, podemos decir que el mérito de Prigogine consiste en haber mostrado, efectivamente que no existen dos flechas del tiempo, sino, en realidad, una sola. Así, el esquema anterior se transforma en el siguiente (esquema 3):



Esquema 3. La flecha del tiempo. Esquema realizado por los autores.

Esto quiere decir que el tema de trabajo de los complejólogos consiste es establecer si y cómo y cuándo una flecha del tiempo se impone, por así decirlo, sobre la otra. Pues bien, con seguridad, la flecha del tiempo que interesa a las ciencias de la complejidad es la flecha del tiempo de la vida –y no la de la muerte; la de desequilibrios y dinámicas, y no la del equilibrio-. Digámoslo de manera franca: las ciencias de la complejidad son ciencias del optimismo, ciencias optimistas. Su tema de trabajo estriba exactamente en el reconocimiento de que, en medio y a pesar de la flecha del tiempo de la entropía, lo que impera en los sistemas vivos, en la naturaleza y en el universo es la flecha del tiempo que genera formas (células de Bénard, ecuaciones de Belousov-Zhabotinsky, en el lenguaje técnico y básico de la termodinámica del no equilibrio), estructuras (= estructuras disipativas), en últimas, vida.

Esta idea, sin embargo, no debe ser entendida de manera determinista. La vida logra imponerse sobre la flecha del tiempo de la entropía, pero no gratuitamente: ello exige un trabajo. Finalmente, las condiciones que explican el triunfo de la vida son exactamente las mismas condiciones que explican el peligro y el fracaso de los sistemas vivos. La vida es un sistema negruentrópico –si cabe aún la expresión- que se hace posible generando entropía alrededor suyo, en el universo.

E. Schrödinger ya se había ocupado de este problema, particularmente en un libro de 1942, *Qué es la vida?* De formación físico, y uno de los padres de la mecánica cuántica, ganador del premio nobel de física en 1933, Schrödinger tiene el mérito de haber sido uno de los primeros –conjuntamente con, en un plano y en un contexto diferente al de L. Onsager– en haber explorado qué son, qué hacen y cómo son posibles los sistemas vivos en medio de, debido a y justamente sobre la base de la termodinámica clásica; es decir, de manera puntual, en relación con el segundo principio, el de la entropía.

La respuesta que aporte Schrödinger apunta en la dirección acertada, aun cuando con un término no muy afortunado: Los sistemas vivos se caracterizan por que son neguentrópicos, esto es: literalmente, niegan la entropía. Así, la neguentropía es el factor que define a la vida, y que nos permite comprender que aunque la vida es un sistema físico, no se reduce a la física, y ciertamente no a la física clásica (= mecánica clásica) y al campo más conspicuo de la misma: la termodinámica (esto es, a la entropía). Los sistemas vivos son, pues, sistemas físicos que remontan la flecha del tiempo de los sistemas físicos inertes y que exactamente en esa misma medida se hacen posibles.

Como se aprecia sin dificultad ya desde este punto, las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida.

L. Boltzmann y J. W. Gibbs ya habían aportado una medición de la entropía a comienzos de los años 1870s. Sin embargo, la medición de la entropía cobra una revitalizada importancia a partir del trabajo fundamental de C. Shannon y su estudiante de doctorado W. Waever publicado en 1948 con el título, *A mathematical tehroy of communication.* Aun cuando existen diferencias entre las mediciones de entropía de Bolztammn y Gibbs con la de Shannon y Weaver, nos interesa aquí mostrar los puntos en común, pues esto nos permite avanzar en la caracterización de las ciencias de la complejidad.

En general, la entropía consiste en la medida de desorden de un sistema; a mayor desorden, más alta la entropía. La comprensión de la entropía por parte de Shannon es más amplia que la de Bolztmann y en general que la de la termodinámica clásica y sirve, por tanto, como marco para entender la flecha del tiempo. En este marco, la entropía hace referencia a la medición de la incertidumbre; en otras palabras, se refiere al contenido de una información promedio cuando se desconoce el valor de una variable aleatoria.

Varios años más tarde W. Zurek ampliará significativamente los trabajos en torno a la medición de la entropía al considerar ya no solamente a la entropía misma sino, además y fundamentalmente, las unidades procesadoras de información y su complejidad. En una palabra, Zurek vincula directamente la información y el procesamiento de la misma con las ciencias de la complejidad, algo que no logra Shannon (específicamente por razones cronológicas, y de contexto cultural, científico y filosófico).

Pues bien, I. Progogine logra demostrar que la física está marcada por la flecha del tiempo que crea patrones y no que los destruye con lo cual, en definitiva, logramos el tránsito de la física del ser a la física del devenir. El tiempo desempeña un papel creativo debido a que lo que impera en el universo no son tanto estructuras conservativas como estructuras disipativas. En una palabra, la idea clásica según la cual, abierta o tácitamente en el universo existen sistemas aislados y/o cerrados se revela gracias a Prigogine como un absurdo: en el universo sólo existen sistemas abiertos, que dependen para su funcionamiento y estructura del medioambiente, de donde obtienen la energía – energía que es en parte conservada, en parte transformada y en muy buena parte incluso desechada de nuevo al medio ambiente. Notablemente, los sistemas vivos son sistemas o estructuras derrochadoras, lo cual, se traduce, en otro contexto y lenguaje como el reconocimiento de que la reserva del universo, la fortaleza del mundo, no estriba en un sistema económico limitado y regulado, sino, por el contrario, por el hecho de que los sistemas vivos son esencialmente posibles gracias a la *redundancia*. Mejor aún, la vida misma es un sistema redundante, y ahí se funda exactamente su fortaleza.

La termodinámica del no-equilibrio trabaja con la ayuda de diversas teoría –teoría de turbulencias, teoría de inestabilidades-, varios métodos –el método del panadero, el estudio de las células de Bénard, por ejemplo-, y acuña novedosos conceptos en la historia de la ciencia –metamorfosis de la ciencia, autoorganización, estructuras disipativas-. Gracias a todas estas herramientas, por así decirlo, matemáticas, conceptuales, teóricas, y sobre el piso de la física y la química, la termodinámica del no-equilibrio logra dar cuenta de la lógica de la vida poniendo de manifiesto que los sistemas vivos inciden sobre o crean la flecha del tiempo –también podría decirse: aprovechan- para hacerse posibles alejándose del equilibrio. El umbral en el que sucede la vida es un espacio comprendido entre el filo del caos y lejos del equilibrio.

Las relaciones en el universo no son uno a uno, sino de muchos a muchos en cruces múltiples y reforzados en los que no existe una única o una fundamental función. El no-equilibrio es justamente el resultado de sistemas dinámicos que aprovechan al máximo las oportunidades y bienes a su alrededor que los transforman y, en esa misma medida, generan tanta entropía como beneficio obtienen del medio ambiente. Literalmente, la vida en el planeta está produciéndole entropía al sol del que nos alimentamos.

Digámoslo de manera fuerte y puntual, en el marco de la termodinámica del no-equilibrio: la vida es la respuesta que el universo inventa –por así decirlo-, para resolver el reto de la entropía. Esta idea, sin embargo, no debe ser entendida en sentido teleológico, sino, más adecuadamente, como la respuesta que emerge en un momento determinado en la historia del universo para aprovechar la entropía y resolverla creativamente.

En pocas palabras, la regla en el universo no es el equilibrio ni la tendencia al equilibrio, sino, por el contrario, los equilibrios dinámicos o, lo que es equivalente, la ausencia de equilibrios. Gracias a ellos, justamente, emerge la vida y ella misma se hace posible.

Ahora bien, ¿qué conduce a los sistemas fuera del equilibrio? El espectro de las ciencias de la complejidad no aporta una sola respuesta. Una respuesta adicional es que existen atractores que determinan las dinámicas de los sistemas y fenómenos. El concepto más sugestivo es el de los atractores extraños, un concepto introducido por D. Ruelle.

Los sistemas dinámicos son sensibles a las condiciones iniciales, pero de tal forma que dicha sensibilidad se traduce en que pequeñas modificaciones producen efectos inusitados, perfectamente impredecibles. Lo que esto significa es que la complejidad no es el resultado de movimientos periódicos y regulares, sino, mejor aún, de movimientos aperiódicos, irregulares y, en consecuencia, impredecibles e incontrolables. De esta suerte, las ciencias de la complejidad no son ciencias de control; su interés se vuelca sobre el plano de lo que no fue nunca atendido en la historia de la humanidad occidental a saber: por la ausencia de control, o también por el control que pierde la capacidad de anticipación o de predicción de sí mismo tanto como de lo que controla y manipula.

El descubrimiento del caos por parte de E. Lorenz significa un golpe tremendo para la tradición aristotélica de la ciencia y la filosofía de la ciencia. De acuerdo con Aristóteles y la tradición que se desprende de él, tan solo puede haber ciencia de lo universal. La ciencia de fenómenos particulares no es ciencia. Eso entra en el dominio de la opinión, y particularmente de la retórica[12]. Ulteriormente, lo que es por sí mismo sería el tema por excelencia de la metafísica.

El caos es descubierto por la meteorología, quizás el más transitorio de todos los fenómenos[13]. Y lo que descubre Lorenz es doblemente significativo: de un lado, se trata del hecho, sorprendente a la luz de la ciencia moderna, de que la ciencia no puede hacer predicciones de determinados fenómenos. Y de otra parte, es el hecho de que de fenómenos perfectamente transitorios no solamente es posible, sino que además es necesario hacer una ciencia. Pues bien, ambos aspectos se integran sólidamente: lo que caracteriza a la ciencia contemporánea no es el hecho de que haga predicciones. Los científicos son tales debido a que llevan a cabo una tarea que es harto más significativa y difícil: explicar. La ciencia no predice sino explica, permite comprender fenómenos, procesos, situaciones. Cuando una

[12] En el mejor espíritu griego, la ciencia se clasifica entre aquello que es κατα αυτο y aquello que es κατα συμβεβεκοσ; es decir, aquello que es por sí mismo o según sí mismo, y aquello que es por accidente.
[13] La historia del descubrimiento y desarrollo del caos, primero como teoría y luego como ciencia está muy bellamente narrada en el libro de J. Gleick.

explicación está bien hecha, entonces, por añadidura, cabe pensar en hacer (= o se hace efectivamente) una predicción[14].

El segundo mérito grande del estudio del caos consiste en que pone de manifiesto una conexión sólida entre fenómenos a distancia, causas pequeñas, efectos y consecuencias impredecibles, convirtiendo en ciencia lo que tradicionalmente había sido el tema de la poesía o de la metafísica. El universo se encuentra conectado de diversas y sutiles maneras, y todas ellas responden a y pueden ser comprendidas gracias a la presencia de atractores fijos, periódicos y extraños. Sin embargo, con total seguridad, los dos primeros tan sólo sirven como grupos de control, por así decirlo, puesto que el tema central de trabajo de los caotólogos consiste en identificar atractores extraños: una tarea que se dice fácil pero que es muy difícil de llevar a cabo.

Pues bien, exactamente en este contexto es en el que entra como ayuda –si cabe la expresión- la geometría de fractales: en la base de todo atractor extraño se encuentra un fractal. O lo que es equivalente, los atractores fractales tienen una dimensión matemática que constituye exactamente el trabajo de la geometría de fractales.

Desarrollada en 1977, la geometría de fractales constituye uno de esos ejemplos conspicuos en la historia de la ciencia contemporánea en el sentido de que es formulada no en un artículo científico –como es el estándar de las modernas teorías científicas, sino en un libro; es más, en un grande y voluminoso libro: *La geometría fractal de la naturaleza* de B. Mandelbrot.

La idea que funda la obra de Mandelbrot no es difícil, pero sí auténticamente revolucionara. Contra la tradición pitagórico-aristotélica que afirma que el universo está constituido por sólidos perfectos, Mandelbrot desarrolla una geometría que, indirectamente, pone de manifiesto que los sólidos perfectos son abstracciones y que no existen en la naturaleza y, de otra parte y al mismo tiempo, demuestra que la economía de la naturaleza se funda en formas, figuras y patrones irregulares. Fractales –quebrados- justamente.

La geometría de fractales se sitúa exactamente en la misma longitud de onda que las geometrías no-euclidianas y, más originariamente, en la línea de la topología y la teoría de conjuntos; en el mismo tenor que la teoría de conjuntos de G. Cantor, los conjuntos de Serpiensky, Koch y Julia, por ejemplo. De consuno, la geometría fractal nos enseña a pensar la naturaleza en términos de conjuntos y no como un agregado de elementos, a la manera de Platón y de Aristóteles y que fuera sistematizada en *Los Elementos* de Euclides.

Al mismo tiempo, y de una forma aún más radical, gracias al desarrollo del computador, Mandelbrot nos permite comprender que la naturaleza se funda en patrones iterados que crean formas en bucles de retroalimentación positivos y negativos. De esta suerte, aspectos de la teoría de números como las series de Fibonacci quedan incorporadas en los fractales como una de las expresiones económicas y, por tanto, robustas, del universo. Por

[14] Exactamente en este contexto, uno de los ejes de la filosofía de la ciencia en el curso de los años 1960s y 1970s girará en torno a lo que sea la explicación científica y su(s) relación(es) con la comprensión. Notablemente, la obra de Hempel, de un lado, y el debate entre el justificacionismo y el explicacionismo ocupará durante varios lustros la escena principal de la filosofía de la ciencia.

derivación, todo lo que sea naturaleza –en el sentido primero o segundo de la palabra- puede y debe ser entendida en función de fractales, ya sea escalantes o no escalantes, aleatorios o brownianos[15]. Una aplicación particularmente importante de esta idea es el propio libro de Madlebrot sobre fractales y finanzas. La geometría de fractales nos enseña la noción de que existen simetrías dinámicas – algo perfectamente novedoso en la historia del pensamiento humano.

La cuarta de las ciencias de la complejidad es la teoría de catástrofes. "Catástrofe" es el título que se emplea en un campo y momento de las matemáticas y, adicionalmente, en las ciencias de la complejidad, para designar cambios súbitos, imprevistos e irreversibles. De esta suerte "catrátrofe" no debe ser entendido necesariamente en un sentido negativo puesto que existen también catástrofes maravillosas en la naturaleza y en la vida de los seres humanos.

La historia de la teoría de las catástrofes es, en cuanto teoría matemática, un episodio más bien dramático en la historia de la ciencia. Y como numerosas veces sucede, la historia de una teoría se corresponde en cierto modo con la biografía misma de quien la desarrolla o la formula. El padre de las catástrofes es R. Thom, aunque E. C. Zeeman cumple también un papel destacado[16].

Aunque R. Thom recibe la medalla *Fields* por sus trabajos en torno al cobordismo, la teoría de catástrofes es la verdadera pasión de Thom. Lo que cabe decir es que, en el mejor de las acepciones, la teoría es (= termina siendo) un *lenguaje*, a saber: el lenguaje que permite construir una teoría general de modelos que tiene por finalidad expresar dinámicas, movimientos, procesos justamente súbitos, sorpresivos e irreversibles tanto en la naturaleza como en la sociedad en general. Hoy por hoy, la teoría de catástrofes no ocupa un lugar verdaderamente protagónico en el escenario de las ciencias de la complejidad dado que otras teorías, modelos y ciencias resultan más idóneas para tratar los asuntos que conciernen a la teoría desarrollada por Thom. Pero, como siempre suele suceder, que no lleve a cabo un papel protagónico no impide que sean siempre los papeles secundarios los que puedan terminar robándose la atención de espectadores, conocedores y aficionados –para emplear una metáfora propia del cine o del teatro- en un entramado de magnífica complejidad.

La ciencia de redes emerge como la quinta de las ciencias de la complejidad entre los años 2001 y 2003. Es la más reciente y, como sucede con frecuencia en ciencia, por su novedad la gran mayoría de las miradas se vuelca sobre esta ciencia, desarrollada por S. Strogatz, D. Watts y L. Barabasi, de manera independiente.

---

[15] La geometría de fractales es, con total seguridad, una de las dos clases de geometrías principales que nos permiten acceder inmediatamente al infinito. La otra geometría que logra algo semejante es la desarrollada por D. Coxeter (grupos de Coxeter, números de Coxeter, diagramas de Coxeter) como resultado de su trabajo con teselados y politopos. (Hemos trabajado la geometría politopos de Coxeter pero debe quedar aquí al margen en razón al tema mismo de este libro).

[16] Digamos, *en esprit*, que la historia de las relaciones entre E. Lorenz y D. Ruelle en el marco del caos, y la de R. Thom y E. C. Zeeman, en el contexto de las catástrofes es análogo, *mutatis mutandi*, no solamente entre sí, sino también con la relación (el debate) entre Darwin y Wallace, a apropósito de la teoría de la evolución y el descubrimiento de la selección natural como el mecanismo determinante de la evolución misma.

Las redes complejas tienen como fundamento al mismo tiempo a la topología y la teoría de grafos, pero nace, se nutre y se proyecta como una ciencia válida tanto para las clásicamente llamadas ciencias sociales (D. Watts es sociólogo de formación), tanto como para las matemáticas (que es el caso de la formación de S. Strogatz) o la física (como sucede, correspondientemente, con L. Barabasi). Sus orígenes se remontan a los trabajos pioneros de matemáticos como Gauss y P. Erdös, o a las investigaciones psicológicas de S. Milgram. La asunción básica de la ciencia de redes es que vivimos en un mundo pequeño.

En efecto, en contraste con toda la historia de la humanidad cuando abierta o implícitamente se asumió que el mundo era ancho y ajeno[17], es definitivamente con la llegada de la ciencia de redes complejas que podemos comprender, efectivamente, que las ciencias de la complejidad son las ciencias de un mundo diferente de suma cero en donde la regla son juegos diferentes de suma cero, justamente. Es decir, se trata de un mundo alta y crecientemente entrelazado, interdependiente, sensible en múltiples escalas y de maneras diferentes, en donde, literalmente, como lo anticipó con acierto el caos, el aletear de una mariposa en Brasil puede ocasionar lluvias en los Estados Unidos o Canadá. Este mundo diferente de suma cero es el mundo actual y previsible e irreversiblemente, el mundo hacia futuro, y que se expresa en títulos tan variados como: globalización, mundialización o internacionalización. En este mundo, la política local es geopolítica, del mismo modo que el comercio local es economía ecológica, por ejemplo.

Vivimos en un mundo pequeño – ya sea por razones tecnológicas, ecológicas, financieras u otras. En un mundo semejante, la pregunta tradicional se invierte, por así decirlo. Pues bien, la tesis de la ciencia de redes complejas es la de que un objetivo determinado puede ser alcanzado en seis o menos grados de distancia ("seis grados de separación"). En consecuencia, el concepto central es el de escala: notablemente, el estudio de redes libres de escala, nodos y *hubs* (un término difícil de traducir y que designa tanto una concentración de nodos como un centro catalizador de numerosas relaciones (*links*)).

Las aplicaciones de las ciencias de redes son amplias y van desde los estudios epidemiológicos hasta la psicología de las organizaciones y el liderazgo, desde la física y las finanzas, hasta los sistemas militares, en fin, desde los estudios de logística e investigación de operaciones hasta la política y la sociología. No en última instancia, hay temas propios de las ciencias cognitivas y la filosofía de la mente que se cruzan transversalmente con el estudio de las redes complejas.

La quinta de las ciencias de la complejidad se articula en diferentes teorías, entre las cuales destacan la criticalidad autoorganizada, la teoría de percolaciones, la teoría de cascadas y los mapas topológicos. Sin lugar a dudas, es el ejemplo más reciente de que la complejidad es, intrínseca y necesariamente, transversal, integral o, como se suele decir en referencia a la filosofía de la ciencia de mediados de los años 1980s: inter, trans y multidisciplinar.

[17] La recomendación siempre fue, desde el antiguo oriente hasta la colonización de los Estado Unidos, la de *Go to the West, young boy*. Para los Chinos, el oeste era la India, tierra promisoria en muchos sentidos; para la conquista y colonización de Norteamérica se trató de California y con ella, la llegada, sin saberlo, al Océano Pacífico.

Hay dos planos principales de trabajo en la ciencia de redes complejas. De un lado, la mayoría de los estudios y trabajos conciernen sincronizaciones en el espacio. Precisamente en este sentido la deuda con la teoría de grafos y la topología, por ejemplo, es grande. Pero, particularmente gracias a S. Strogatz, la atención se ha volcado también hacia fenómenos de sincronización temporal. Las conexiones sutiles entre escalas del universo, dimensiones de la realidad y planos de fenómenos, comportamientos y sistemas resultan entonces sencillamente maravillosas. Gracias a la ciencia de redes complejas podemos efectivamente comprender que los hilos que unen a las cosas, a los seres humanos entre sí, a los seres humanos y al planeta, en fin, incluso a los sistemas biológicos y al universo son numerosos y sorprendentes. Esta circunstancia nos permite avanzar un paso en la caracterización del tipo de ciencia que son las ciencias de la complejidad: la ciencia consiste en hacer visible lo invisible. Es decir, que lo que ayer era objeto de especulación –en cualquier sentido de la palabra- es hoy objeto de la ciencia. La ciencia de redes es otro de los canales principales mediante los cuales las ciencias de la complejidad se encuentran estrechamente entrelazadas con la física cuántica. Notablemente, a propósito de fenómenos y comportamientos como la decoherencia cuántica y el entrelazamiento (*entanglement*).

Desde los orígenes de la humanidad occidental ha existido una sólida relación entre la ciencia en general, la filosofía y la lógica. Aristóteles sostenía que la lógica era el *organon* del conocimiento – científico o filosófico. La tradición posterior situó a la lógica como uno de los componentes de la filosofía. En rigor, la lógica sirve de fundamente para la fundamentación formal de la ciencia; ya sea en términos de argumentación o de demostración, de razonamiento o de vínculo con el mundo y la realidad.

Digámoslo de manera franca y directa: las ciencias de la complejidad son, análogamente a toda la ciencia habida en la historia de la humanidad, *ciencia formal*. La formalidad hace referencia al *rigor* mismo. Este es un tema en el que los científicos en general no están (ni estamos) dispuestos a hacer concesiones. Ahora bien, el rigor –la formalidad- es de distintos tipos; así, por ejemplo, rigor conceptual, rigor semántico y sintáctico, rigor lógico, rigor matemático o rigor computacional. La formalidad es el hecho mismo de que la ciencia se asume a diferencia de y en contraposición con otros saberes y conocimientos que no admiten un rigor como rasgo distintivo del discurso y de la práctica que son la ciencia - en general.

Pues bien, la lógica de las ciencias de la complejidad se caracteriza por el hecho de que son múltiples; se trata de las lógicas no-clásicas. Como es sabido, las lógicas no-clásicas surgen debido a una dúplice circunstancia: de un lado debido a que las formalizaciones de la lógica clásica –en sentido estricto, la lógica simbólica o lógica matemática- eran muy rígidas; y de otra parte, debido a que sus formalizaciones eran demasiado flojas. Como consecuencia, emergen sistemas alternativos de notación que posteriormente llegarán a ser conocidas como las lógicas no-clásicas y, en un sentido más positivo, como lógicas filosóficas. Nuestro propósito aquí no es el de mostrar cómo surgen las lógicas no-clásicas sino el de presentar sus rasgos de familia y la forma como entran a alimentar a y formar parte de las ciencias de la complejidad. Entre tanto, como quiera que sea, la discusión permanece abierta hasta la fecha acerca de si las lógicas no-clásicas son lógicas complementarias o alternativas a la lógica formal clásica.

Las lógicas no-clásicas implican, de entrada, el reconocimiento de que existen numerosos o diversos modos de "verdad". Más exactamente, las lógicas no-clásicas afirman la idea misma –a todas luces revolucionaria- de un pluralismo lógico – lo cual, traducido adecuadamente, significa el reconocimiento inmediato de un pluralismo epistemológico, pluralismo metodológico, pluralismo de tipos de racionalidad, pluralismo de lenguajes, en fin, un pluralismo de formas de pensar y, en consecuencia y *a fortiori*, un pluralismo de formas de vivir.

Tal es, con seguridad, la marca distintiva de la complejidad, a saber: las ciencias de la complejidad son, afirman, trabajan con la idea misma de pluralidad, diversidad, alteridad, pero de tal tipo que la pluralidad es irreductible (o irreducible) a niveles anteriores o inferiores, cualquiera que sea el plano, el contexto y la justificación. Justamente en este sentido se dice que los sistemas complejos no son reduccionistas; lo que se quiere afirmar es que no se pueden reducir a niveles o formas anteriores, ni en términos epistemológicos o cognitivos, ni tampoco en términos ontológicos o de (tipo de) realidad.

Es importante subrayar que, gracias al desarrollo de las lógicas no-clásicas, ha sido posible el reconocimiento explícito de que, si bien el campo de trabajo de la lógica en general – tanto la clásica como las no-clásicas es el lenguaje en general y, en particular, el lenguaje proposicional[18], las verdades lógicas lo son sobre cualquier cosa. En otras palabras, la lógica en general ya no se circunscribe exclusivamente al ámbito de silogismos o al dominio que evita paralogismos, entimemas y otros errores lógicos.

Los planos de trabajo de las lógicas alternativas puede decirse que trabajan en paralelo –en un ataque masivo, si cabe la expresión- retos, desafíos y limitaciones de la lógica matemática y exploran, inauguran y construyen un mundo literalmente novedoso, particularmente cuando se lo mira con los ojos de la tradición. Sin embargo, a pesar de una apariencia de coordinación en la acción contra la lógica formal y de exploración y construcción del mundo nuevo inaugurado por las lógicas no-clásicas, no hay que pensar que se trata de un ataque o una acción coordinada. Más exactamente, no existe un centro a partir del cual se irradie la pluralidad de las lógicas filosóficas. Estas operan, trabajan y actúan como un verdadero enjambre[19].

Algunos de los temas de las lógicas no-clásicas que manifiestamente se integran o se cruzan con las ciencias de la complejidad son los siguientes:

- Desde las lógicas polivalentes, la afirmación misma y el trabajo con sistemas de n-valores en los que $3<=n< \infty$, podemos entrever un panorama que abarca desde lógicas trivalentes en un extremo hasta lógicas infinivalentes. Por decir lo menos, la complejidad combinatoria es magnífica y la serie de dimensiones contribuye a enriquecer de manera significativa la comprensión y la acción en/sobre el mundo.

[18] La razón por la que el campo de trabajo de la lógica en general es el lenguaje proposicional es debido a que únicamente en este lenguaje acaece "verdad" o "falsedad". Ciertamente que existen numerosos otros lenguajes pero ellos no son del interés de la lógica; quedan como espacios propios de trabajo para otros ámbitos, tales como la poesía, la psicología, la literatura y otros más.

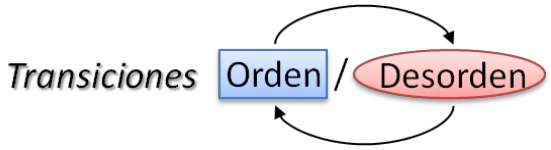
[19] Tomamos el término no como una metáfora, sino en el sentido preciso que el concepto tiene en las ciencias de la complejidad, relativamente al concepto de *inteligencia de enjambre (swarm intelligence)*.

- Existen diversos sistemas deductivos, y no ya uno solo. La existencia de sistemas multideductivos contribuye, con seguridad, al mismo tiempo a enriquecer el mundo, la naturaleza y la sociedad en general, pero, a la vez, expresa un rasgo de complejidad en el sentido al mismo tiempo de no-linealidad y de dificultad. El descubrimiento de la existencia de sistemas multideductivos y el trabajo consiguiente de formalización de los mismos constituye, a todas luces, una tarea totalmente innovadora cuando se la mira con los ojos de la tradición.
- Incluso una lógica no demasiado alternativa a la lógica formal clásica como la lógica de contrafácticos plantea de entrada, inmediatamente, la existencia de distintos mundos posibles. Pues bien, tal es exactamente el tema de base en la lógica de contrafácticos, a saber: el trabajo con mundos posibles y no ya la reducción a un, por definición, único mundo real. Desde aquí cabe construir, sin dificultad alguna, un puente hacia las ciencias de la complejidad en el sentido de que la complejidad es el trabajo esencialmente con posibilidades, antes que con realidad(es).
- La lógica formal clásica constituye la mejor defensa posible para el principio de idempotencia. No en vano existe una fuerte implicación recíproca entre la lógica formal clásica y la matemática. Sin embargo, el simple reconocimiento de que en la ciencia contemporánea hablamos de las matemáticas permite adoptar una distancia grande con respecto a la idea de una canónica del pensamiento. Con las lógicas no-clásicas hemos hecho el descubrimiento de que no existe absolutamente ninguna canónica del pensamiento. A fortiori, por tanto, no se obedece ya o no se cumple ya sin más el principio de idempotencia. Los grados de libertad ganados son grandes, relativamente a la historia del pensamiento tradicional.
- El mundo es la interface entre la escala microscópica y la macroscópica del universo. Desde luego, cada una de ellas se caracteriza por que está articulada en otros niveles y subescalas. La lógica cuántica se ocupa de los tipos de correspondencias entre ambas escalas y, más determinantemente, entre sus dinámicas, estructuras y temporalidades. De esta suerte, las lógicas no-clásicas –gracias a las contribuciones de la lógica cuántica- ponen de manifiesto que la realidad es esencialmente decoherente y el resultado de superposiciones en las que, de entrada, ontológicamente, estamos marcados por incertidumbre.
- En el campo de las lógicas paraconsistentes, se viene trabajando en el desarrollo no solamente de un álgebra paraconsistente sino, mejor aún, de un cálculo paraconsistente. Estos trabajan apuntan en una dirección bien precisa: el estudio del movimiento en general demanda de instrumentos más refinados aún que el clásico cálculo infinitesimal –diferencial e integral- desarrollado por Newton y por Leibniz. El horizonte se antoja fructífero y más amplio y profundo que nunca.
- La lógica difusa hace evidente que el trabajo con grados –gradientes- constituye una herramienta inmensamente más refinada y exacta en múltiples sentidos que los valores clásicos de la lógica formal clásica. Al respecto baste con recordar que el fundamento lógica de todas las nuevas tecnologías es la lógica difusa. En este marco vale mencionar que si bien ésta es la única lógica que ha logrado ser implementada tecnológicamente –en el sentido al mismo tiempo más amplio, fuerte y preciso de la palabra, las demás lógicas no-clásicas aguardan ante sí aún el momento en el que puedan ser aprovechadas técnica, instrumental, tecnológicamente. Cuando ello sea

posible, el universo se habrá enriquecido magníficamente para los seres humanos y para la vida en general.

En síntesis, las lógicas no-clásicas ponen de manifiesto un mundo de complejidad creciente. Pero es absolutamente fundamental que la comunidad de investigadores, académicos, tanto como el sector privado y el sector público, así como la sociedad civil se formen de cara al mundo de las ciencias de la complejidad. Este trabajo de formación representa, con toda seguridad, la más magnífica de todas las inflexiones posibles, hasta el momento, en la historia de la humanidad.

Para concluir este capítulo, sinteticemos lo que precede señalando que las ciencias de la complejidad se ocupan de las transiciones orden/desorden (esquema 4). Es decir, tratan acerca de cómo el orden se rompe y por qué, y cómo, a su vez, a partir del desorden se puede generar nuevo –distinto- orden. En la expresión mencionada, el énfasis recae en *transiciones*, así: las ciencias de la complejidad se ocupan de las *transiciones* orden/desorden. Con seguridad, ninguna otra ciencia ni filosofía en la historia de la humanidad se había ocupado de un tema semejante.



Esquema 4. El problema de las ciencias de la complejidad: las transiciones orden/desorden. Esquema realizado por los autores.

La ciencia en general tiene exactamente la misma pasión, el mismo interés, la misma preocupación que la religión, la magia, el mito, la poesía, o la literatura, por ejemplo. Se trata, al fin y al cabo, del interés –ese interés en cuya base se encuentra el conocimiento y que nace, como bien señala Aristóteles, en un principio de placer: *el placer del conocimiento*-, a saber: comprender qué es, qué es el orden, qué es el universo, la realidad. El nombre con el que se identifica al problema o al objeto de estudio, por así decirlo, puede variar, como es efectivamente el caso, de un autor a otro, de una práctica a otra, de una cultura a otra, en fin de una época a otra, por ejemplo.

Pues bien, exactamente en esta línea de pensamiento, el mundo de la complejidad no solamente se interesa por el orden –por aquello que es-, sino, mejor aún, por las dinámicas y relaciones que, en ocasiones, quiebran el orden, lo subvierten, lo rompen o lo alteran. Y cómo, a su vez, a partir del desorden, de la anomia, del caos, de la incertidumbre y demás puede surgir otro orden, un nuevo orden (relativamente al que había antes de la anomia y el desorden).

Esta idea significa que las ciencias de la complejidad hacen suya la dinámica (= *transiciones*), entre el orden y el desorden, o entre el desorden y el orden. Vivimos en un universo no ergódico, y la no-ergodicidad expresa, de manera precisa, el hecho de que cualquiera que sea el orden existente, éste siempre, inevitablemente se romperá para, a partir del desequilibrio constituir un equilibrio de mayor complejidad. Nada es permanente, pero también nada está abandonado al azar y al cambio sin más. La evolución conduce a los

sistemas, al mundo y en últimas al universo, como un todo, a niveles, estructuras, dinámicas y procesos de complejidad creciente en lo que está en juego, ulteriormente, es el horizonte mismo de comprensión, el horizonte mismo de posibilidades. El peor de los futuros siempre será mejor que el mejor de los pasados, por el simple hecho de que sea futuro, es decir, de que haya horizontes, posibilidades.

2. El problema más difícil

Criterios de demarcación de/para la complejidad

En uno de sus libros más importantes y sin embargo menos conocidos, K. Popper sostiene[20] que los dos problemas fundamentales de la epistemología son: el problema de la inducción y el problema de los criterios de demarcación. El primero, como se sabe, se origina en la obra de D. Hume y consiste en el problema de cuántas observaciones particulares son necesarias o suficientes para llevar a cabo y sostener una generalización. Este problema, sostiene Popper, ha quedado resuelto por él[21]. La respuesta es elegante y sencilla: toda inducción es una deducción. Sin embargo, afirma Popper, el problema del criterio de demarcación queda sin resolver.

Con seguridad, el problema de los criterios de demarcación se remonta a los orígenes mismos de la humanidad occidental y atraviesan la historia de los últimos 2500 años. Es posible presentar este problema de varias maneras:

- De entrada, en la obra de Platón, aparece, en su expresión más general, como el problema de la distinción entre el ser (*to on*) y la apariencia (*to pseudos*) – y encuentra en *La República* su mejor tratamiento. Sin embargo, en otros diálogos, aparece como las distinciones entre quien es amigo y no lo es, quien es justo y lo parece, quien es hermoso y no lo es, quién es el filósofo y quién el sofista, quien es piadoso y quien lo aparente, y demás. – Frente a este problema, el mejor criterio elaborado por Platón consiste en su llamado recurrente a la distinción: *horismós*, y que es distinción de conceptos, de planos y de contextos. Así, mientras que el sofista se caracteriza porque todo lo mezcla, todo lo relaciona sin más, salta de un contexto a otro, y es sumamente habilidoso con el lenguaje y el pensamiento, el filósofo, por su parte, sabe bastante poco menos (el famoso "sólo sé que nada sé" de Sócrates y que es expresión de su *eironein, eironía*), y procede por preguntas y por diferenciaciones; lo dicho: distinciones.
- En la Edad Media es el famoso problema de distinguir entre el creyente –el creyente verdadero- y el no-creyente o, peor aún el que cree otras cosas. La *Summa contra gentiles* puede ser mencionada en este contexto como un ejemplo conspicuo. Sin embargo, asimismo, puede hacerse referencia a la distinción entre lo verdadero (o la

[20] K. Popper, *Los dos problemas fundamentales de la epistemología*, Madrid, Ed. Tecnos, 1998.
[21] En efecto, la solución del problema de la inducción lo lleva a cabo el filósofo austríaco en el libro: *La lógica del descubrimiento científico*, Madrid, Ed. Tecnos, 1978.

verdad) y la apariencia (o el error) y que constituye un sólido motivo que da lugar progresos verdaderamente significativos en lógica y en el estudio del lenguaje, sin dudas, las grandes contribuciones del Medioevo en materia de ciencia y pensamiento.

- En el plano de la filosofía del empirismo en la modernidad, se trata de las distinciones entre cualidades primarias y cualidades secundarias y cuya mejor elaboración aparece en la obra de Locke y, de otra manera, antes también en Hobbes. Al respecto, como es sabido, lo verdaderamente significativo estriba en el hecho de que estas distinciones –que teóricamente forman parte de una teoría del conocimiento- aparecen como *conditio sine qua non* para la formulación de una teoría política, a saber: la teoría del liberalismo político clásico antecesor del triunfo político de la burguesía en la revolución de 1789.
- E. Morin ha aportado seguramente la mejor contribución al problema, así: la dificultad grande de distinguir entre el ser y el no-ser o entre el ser y la apariencia consiste en el hecho de que el no ser (o la apariencia) nunca se manifiestan como tales, como lo que son (apariencia), sino siempre como lo contrario de lo que son (ser).

No se trata aquí, sin embargo, de elaborar una historia acerca del problema relativo al criterio de demarcación. En general, lo que sí cabe decir es que se trata, con seguridad, del más difícil y el más importante de todos los problemas en la vida, en ciencia, en filosofía. Habitualmente, el marco en el que se lo trabaja es el de la filosofía de la ciencia.

Queremos aquí, en realidad, abordar el problema relativamente a las ciencias de la complejidad. La razón consiste, de un lado, en el hecho de que en la bibliografía consultada y conocida no existe ningún tratamiento al respecto. De otra parte, existe, notablemente entre la comunidad académica –y no tanto entre la comunidad científica- una fuerte tendencia natural a mezclar, a realizar tránsitos, incluso a asimilar como equivalentes temas afines que en realidad, sostenemos, no lo son. Así, de manera puntual, el problema estriba en al abordaje de criterios de demarcación entre las ciencias de la complejidad y el pensamiento sistémico, tanto como con el llamado pensamiento complejo – y que hace referencia a la obra de E. Morin y sus epígonos. Por derivación, se trata del criterio de demarcación entre complejidad y cibernética, complejidad y sinergia, en fin complejidad y ciencia clásica – de corte lineal, reduccionista, causal. Tal es el objeto de estudio a continuación.

Antes, sin embargo, se impone una observación puntual. Sería relevante trazar criterios de demarcación entre el pensamiento complejo y el pensamiento sistémico; o entre el pensamiento sistémico y la ciencia clásica de corte analítico; incluso también entre los enfoques sistémicos y la cibernética. No es ese, sin embargo, nuestro interés. Por el contrario, el carácter de esta investigación consiste en la determinación, delimitación, aclaración acerca de las ciencias de la complejidad. Por esta razón las demás áreas serán cotejadas con las ciencias de la complejidad y no entre sí.

2.1. La distinción entre complejidad y pensamiento sistémico

La historia de la humanidad occidental ha sido, desde sus orígenes a partir de Platón y Aristóteles y las tradiciones que ellos inauguran y se proyectan en los siglos siguientes, la creencia de que existen conocimientos mejores que otros, lenguajes mejores que otros, en fin, formas superiores de ciencia. Así, la historia del conocimiento en toda la extensión de la palabra, fue siempre la historia de la jerarquización y, consiguientemente, de especialización del conocimiento humano. Esta historia, sin embargo, encuentra el mejor antecedente en la obra de Pitágoras y los pitagóricos.

De esta suerte, se establece la creencia según la cual existen conocimientos supremos, mejores, más dignos, más acabados, más rigurosos o formales, en fin (como se prefiera), que otros. Toda la historia de la humanidad occidental ha pivotado en torno a esta creencia. Ella se ha traducido y ha conformado todas las formas de organización del conocimiento, desde el Liceo y la Academia, hasta la Stoa y la Universitas hasta nuestros días. De consuno, esta creencia tiene una clara implicación inmediata, a saber: el conocimiento debe ser preservado de la sociedad, y la sociedad sólo puede acceder al conocimiento después de pasar diversas pruebas (de confianza, de formación, de desarrollo, y otras). Estrictamente hablando, la historia de la organización del conocimiento se funda a la manera y en el espíritu de las sociedades secretas y las sociedades discretas (siendo, en la historia de Occidente, la primera de ellas verosímilmente la de los Pitagóricos).

El resto, es historia conocida. Se trata, esencialmente de la historia mediante la cual la sociedad accede a una escisión, abierta y directa o tácita entre conocimiento exotérico y conocimiento esotérico; éste como el verdadero y fundamentado /y fundamental) y aquel como de menor valía e importancia (estratégica). Esta historia se comienza a quebrar en los años 1960s y 1970s, a través de dos canales diferentes.

El pensamiento sistémico es uno de los esfuerzos más sólidos en la historia de la humanidad occidental por superar la historia que queda bosquejada (el mejor antecedente de los esfuerzos del pensamiento sistémico fue el Enciclopedismo de Diderot y D´Alembert. Al respecto, no hay que olvidar nunca la carga política que tenía el Enciclopedismo de los siglos XVIII y XIX, algo que difícilmente puede decirse de los enfoques sistémicos, salvo por dos o tres nombres. Volveremos sobre esta idea).

Los enfoques sistémicos –que a la postre serán conocidos como la ciencia de sistemas[22]-, constituyen una reacción a la historia de la especialización de la ciencia, del conocimiento humano, una historia que es, en rigor, de disciplina, en el doble sentido de la palabra, una

[22] En el 2009 se publicó la *Encyclopedia of Complexity and Sysems Science*, con R. A. Meyers como Editor en jefe, publicada en 10 volúmenes por la prestigiosa editorial Springer. Esta enciclopedia debe ser vista en por lo menos tres sentidos: de un lado, muestra el triunfo de las ciencias de la complejidad; de otra parte, pone de manifiestas las cercanías entre complejidad y enfoques sistémicos; y finalmente, conduce a la confirmación de que los enfoques sistémicos han llegado a constituirse como ciencia de sistemas.
Sin embargo, precisamente debido a estos tres rasgos principales, se impone un criterio de demarcación, algo que no aparece en la Enciclopedia, por ejemplo, aunque para los *insiders* en complejidad puede ser visto con claridad. La dificultad es que dado el carácter mismo de una enciclopedia, esta está dirigida especialmente para los *outsiders*; pues bien, estos –la inmensa mayoría- pueden asimilar como equivalentes complejidad y sistémica, algo que, *tant dans la lettre que dans l´esprit*, no es verdadero.

expresión que le debe mucho a los trabajos de M. Foucault. Precisamente en este sentido, se definen a sí mismas como tanto como teoría y como enfoque de *sistemas*. El origen del estudio de sistemas es triple, así:

- De un lado, el trabajo pionero de L. Von Bertalanffy da lugar a la *teoría general de los sistemas*, con un libro publicado por primera vez en 1968. Aquí merece especial mención el carácter mismo del trabajo: como una teoría *general*, y no, en manera alguna, como una teoría de rango medio, aplicada o de corte estrictamente disciplinar;
- De otra parte, A. Bogdanov había formulado la idea de una *tektología* en 1910-1913. Como con frecuencia ha sucedido en la historia de la ciencia, este trabajo, perfectamente original y en la mejor línea de los enfoques sistémicos, permaneció oculto debido a las circunstancias internas de la Rusia entre 1907 y 1917 y, a fortiori, luego del surgimiento de la U.R.S.S. Asimismo, en Occidente permanece desconocida la tektología, y la primera traducción al inglés será en 1996. Hay que decir que para cuando es (re)descubierta, ya es muy tarde;
- Finalmente, un tercer origen de los trabajos sistémicos tiene lugar en la llamada Escuela de Palo Alto (California, E.U.), en los encuentros y trabajos sugestivos de los que participan científicos de la talla de M. Mead, G. Bateson, P. Watzlawick, o E. Laszlo, entre otros. Esta Escuela se opone de manera frontal a los trabajos de C. Shannon sobre la teoría matemática de la comunicación por considerarlos reduccionistas y lineales.

A estos tres orígenes vienen a sumarse una serie amplia de autores entre los que merecen un lugar especial, antes, durante y después, H. von Foester, J. W. Forrester, F. Capra, H. Maturana y F. Varela, G. Midgley, por ejemplo.

El pensamiento sistémico determina su propio ámbito de trabajo: se interesa en "sistemas", esto es, en complejos de elementos que se encuentran en interacción. De esta suerte, las interacciones –y en consecuencia, las relaciones- constituyen el foco de trabajo de la teoría, el enfoque o el pensamiento sistémico – tres maneras de designar una misma geografía.

A partir de la capacidad de relacionar, el pensamiento sistémico plantea un cruce o una integración entre disciplinas y ciencias diferentes, y esta integración se daría justamente en el marco de la teoría general de sistemas (von Bertalanffy) o de las aproximaciones sistémicas. G. Bateson plantea esta misma idea en términos de la búsqueda de y el trabajo con patrones (patterns); es lo que él denomina "la pauta que conecta" (*the connecting pattern*).

Una expresión abierta de parte de von Bertalanffy –y no refutada explícitamente por ningún pensador sistémico- es el hecho de que reconoce que existen sistemas abiertos y sistemas cerrados[23]. Esta es no solamente una diferencia fundamental con respecto a las ciencias de la complejidad sino, peor aún, un error profundo de parte de la teoría general de sistemas.

[23] L. Von Bertalanffy, *General Systems Theory*, p. 39, en: G. Midgley (Ed.), *Systems Thinking. Vol I. General Systems Theory, Cybernetics and Complexity*, Sage Publications; asimismo, *Teoría general de sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*, México, F.C.E., págs. 39-41. De otra parte, cfr. O. Johansen, *Introducción a la teoríaa general de sistemas*, México, Ed. Limusa, 1994. C. A. Ossa Ossa (*Teoría general de sistemas. Fundamentos*, Ed. Gráficas Olímpica, Pereira,

En efecto, en el marco de las ciencias de la complejidad, absolutamente ninguna de las teorías que la componen (por ejemplo, teoría de fluctuaciones, teoría de turbulencias, y otras) así como ninguna de las ciencias que conforman el mundo de la complejidad, sostiene que existan *ni* sistemas cerrados *ni (= mucho menos)* sistemas aislados. En complejidad únicamente existen sistemas abiertos. Más radicalmente: es imposible que existan sistemas cerrados o aislados; se trata, tan sólo de abstracciones. Todos los sistemas son abiertos. Ni siquiera el universo en que vivimos es cerrado o aislado[24].

La idea de que tan sólo existen sistemas abiertos fue, notablemente, la obra de la termodinámica del no equilibrio. Todos los sistemas necesitan para operar, funcionar o vivir (como se prefiera) esencialmente tres elementos que no tienen los sistemas por sí mismos sino que proceden del entorno, del medioambiente. Ellos son: información, materia y energía. Ni la energía ni la materia ni la información provienen de los sistemas –cualesquiera que ellos sean; se encuentran el entorno, provienen del entorno. El medioambiente es un concepto esencialmente indeterminado.

Ciertamente que los sistémicos conocen y emplean el término "complejo" y "complejidad". Pero cuando lo usan tienen el significado de adjetivo o adverbio, a la manera de atributos de los fenómenos y sistemas. En las ciencias de la complejidad lo complejo no designa, en manera alguna, un atributo o una propiedad –notablemente adjetivada o en forma de adverbio- de un fenómeno cualquiera. Es más, ni es bueno, ni es necesario, ni es deseable, en este contexto, que las cosas sean complejas. De hecho, hay fenómenos que no son complejos en el sentido de que pueden ser explicados y comprendidos por vía de herramientas -conceptuales, computacionales, matemáticas y otras- analíticas, estadísticas o lineales. Lo que acontece gracias a las ciencias de la complejidad es que cuando un fenómeno o sistema: a) se comporta de modo complejo: es decir, impredecible, no-lineal, con turbulencias y demás, o bien: b) cuando se hace complejo, entonces existe una caja de herramientas, si cabe la expresión, para comprenderlo, para explicarlos. Son justamente las ciencias de la complejidad.

Una idea cara al pensamiento sistémico es el reconocimiento de que el todo es mayor que la suma de las partes, una idea que en realidad se remonta a Aristóteles. Esta idea se expresa inmediatamente como una visión holística (*holón*) que no reduce el todo a una sumatoria de agregados. En el marco del estudio de los sistemas complejos hay dos rasgos claros que marcan una diferencia fuerte con respecto a la idea del holismo sistémico. De un lado, es el reconocimiento de que los sistemas complejos son de complejidad *creciente*, una idea que implica tanto evolución como sorpresa y emergencia. Así, estrictamente hablando, no es suficiente en el contexto de complejidad con el reconocimiento de que un sistema es más que la sumatoria de sus elementos, puesto que es preciso, adicionalmente, reconocer que los sistemas complejos no permanecen estáticos, o permanentes, sino variables, dinámicos. De

---

2004) trabaja en la misma línea. Sólo menciona (afortunadamente) que existen sistemas abiertos, pero no hace ninguna crítica al punto que estamos considerando; sencillamente pasa por alto lo que sostiene von Bertalanffy.

[24] Notablemente a partir de la cosmología contemporánea y, en particular, gracias a la física cuántica –el tema es de las investigaciones sobre gravitación cuántica y los trabajos tendientes a conocer los orígenes del Big Bang-, ha llegado a ser claro que este universo es tan sólo uno (posible) de varios. Esta idea apunta tanto hacia la pluralidad de universos ("mundos paralelos", "superposición de estados"), como a la existencia de otros universos por fuera del nuestro ("bubbles of bubbles"). Al respecto, cfr. D. Deutsch, *La estructura de la realidad*, Barcelona, Anagrama, 1999, y J. D. Barrow P. C. Davies and Ch. L. Harper, Jr., (Eds.), *Science and Ultimate Reality. Quantum Theory, Cosmology and Complexity*, Cambridge, Cambridge University Press, 2004.

otra parte, al mismo tiempo, gracias a la ciencia de redes, hemos logrado el reconocimiento –por ejemplo por vía del estudio de los fenómenos de percolación, en el estudio de las cascadas y en la base misma de las redes libres de escala- de que las relaciones entre los elementos admiten el estudio tanto de la teoría de grafos y la topología como las variaciones en las relaciones entre los elementos, de suerte que logramos tres escalas fundamentales de redes, así: nodos, links y hubs.

De esta suerte, como lo pone de manifiesta la ciencia de redes complejas, el mundo consiste en seis o menos grados de distancia –grados de libertad- entre un punto de partida cualquiera y un target determinado. Los trabajos de D. Watts L. Barabasi y S. Strogatz fueron desde el año 2001 pioneros al respecto. En consecuencia, se ha logrado un avance bastante más significativo de lo que los sistémicos alcanzan a reconocer.

La filosofía que impregna todo el trabajo, las metodologías y comprensiones de los enfoques sistémicos es el coherentismo. El coherentismo es una determinada filosofía de la ciencia cuyos orígenes se remontan a la obra de R. Chisholm y uno de cuyos más sólidos representantes es N. Rescher. El coherentismo constituye una de las dos escuelas centrales de la epistemología contemporánea –y por derivación también de la filosofía de la ciencia y la metafísica-, conjuntamente con el fundacionalismo.

De acuerdo con la teoría coherentista, el conocimiento, la verdad, en fin el significado de las proposiciones y las teorías son susceptibles de ser entendidas de modo holístico. Pues bien, debido a diversas circunstancias, el movimiento sistémico abraza abierta o tácitamente las tesis del coherentismo y, en consonancia, busca una comprensión, una explicación y en últimas acciones de tipo integral, holístico o sistémico. Esta idea se entiende perfectamente cuando logramos el reconocimiento de que así es como se trabaja efectivamente en campos como la psicología sistémica, la economía sistémica la administración sistémica o los procesos de toma de decisión y la teoría de la acción desde el punto de vista sistémico, por ejemplo.

Si cabe la metáfora, el pensamiento sistémico trabaja con el mundo, con la sociedad o con un problema determinado como con un rompecabezas; en ocasiones un rompecabezas de 50 piezas, o bien de 10000 piezas. Precisamente por ello es habitual encontrar en el lenguaje de los sistémicos expresiones como “relaciones”, “nodos”, “sinergias”, “inestabilidades”, “dinámicas”, y otras. Lo que quiere el pensamiento sistémico es que todas las piezas del rompecabezas encajen perfectamente. Pero lo que no logra entender el enfoque sistémico es que, en numerosas ocasiones:

a) Hay una pieza del rompecabezas que falta (o que se pierde);
b) Hay una pieza del rompecabezas que encaja en un tiempo *x* pero no en un tiempo *y*;
c) Que cuando una pieza encaja (en un tiempo *x*) hay otra(s) que se desencajan (en el mismo tiempo *x* o en un tiempo *y*).

En ciencias de la complejidad en general, por el contrario, existe el reconocimiento explícito de que en numerosas ocasiones existen vacíos lógicos, que existe ruido (blanco) en la información disponible, en fin, por ejemplo, que ni es necesario ni es racional en ocasiones acumular toda la información (posible o disponible) antes de una toma de

decisión. En complejidad la verdad o el significado no termina de explicarse de manera holística, sino, mejor aún, como un sistema esencialmente variable, evolutivo.

Ahora bien, ello no quiere decir entonces que las ciencias de la complejidad opten necesariamente por la vía del fundacionalismo en contraste con el coherentismo. En rigor, es preciso reconocer que el estatuto y la discusión epistemológica en complejidad o bien no ha entrado todavía a profundidad en los terrenos de la filosofía de la ciencia aun cuando sí existen algunos trabajos al respecto[25], o bien, sencillamente, no se ha interesado por estos temas. Creemos que hacia futuro se encuentra aquí una veta formidable de trabajo. Por lo pronto, lo que cabe decirse razonablemente es que el significado o (la) verdad son comprendidos en el contexto de las ciencias de la complejidad como un fenómeno plural, variable, dinámico.

Con frecuencia y cada vez más, los trabajos sistémicos están acompañados de mapas y gráficos que muestran numerosas relaciones, entrecruzamientos e influencias directas e indirectas que gustan mucho a los investigadores y académicos que trabajan en esta línea de pensamiento. En rigor, es preciso decir que se trata generalmente de herramientas eminentemente descriptivas que, computacionalmente, se basan en programas como AtlasT, Stella, Visim, Ithink, y otros.

Un elemento común al pensamiento sistémico y a las ciencias de la complejidad sirve como criterio de demarcación con respecto a la ciencia clásica. Se trata del hecho de que en los dos primeros campos se trabaja no ya con base en el concepto de causalidad, sino, mejor aún, con el concepto de emergencia.

El principio de causalidad, introducido o formalizado por primera vez por Aristóteles, constituye el pivote de toda la racionalidad occidental. Llega a ser asumido incluso hasta el punto de que la tradición, como el sentido común, llega a creer o a afirmar que los grandes acontecimientos obedecen a grandes causas. Pues bien, esa historia se quiebra por varios lados, en paralelo. De un lado, el concepto de emergencia –introducido por primera vez G. H. Lewes en 1875[26]- sirve para explicar todos aquellos procesos, relaciones e influencias en los que: i) no existe ninguna conexión directa entre causa y efecto, y ii) en el efecto es perfectamente imprevisible y no se corresponde, uno a uno, con los elementos contenidos en o explicados por la causa, con lo cual el efecto resulta mayor o cualitativamente distinto a la(s) causa(s).

De esta suerte, el principio de causalidad que era admitido sin más como un factor de explicación universal queda reducido, en el marco de la complejidad o de los enfoques sistémicos, como una razón explicativa *únicamente a nivel local*. Para fenómenos y sistemas en la escala meso o macro la causalidad sencillamente ya no opera. Se hace necesario y resulta mucho mejor el concept de emergencia. Como lo explica J. Holland (*Emergence*), el concepto de emergencia sirve para explicar que de poco surge mucho y lo

[25] Cfr. M. Bunge, *Emergencia y convergencia. Novedad cualitativa y unidad del conocimiento*, Barcelona, Gedisa, 2004; S. D. Mitchell, *Biological Complexity and Integrative Pluralism*, Cambridge, Cambridge University Press, 2003; N. Rescher, *Complexity: A Philosophical Overview*, Transaction Publishers, 1998; C. E. Maldonado, "Esbozo de una filosofía de la lógica de la complejidad", en: Maldonado, C. E., (Ed., *Visiones sobre la complejidad*, Bogotá, Ed. Universidad El Bosque, 2001, pp. 9-27.

[26] Cfr. C. Emmeche, S. Koeppe and F. Stjernfelt, "Explaining Emergence: Towards an Ontology of Levels", en: G. Midgley, *op. Cit.*, pág. 142.

mucho que resulta no es reducible, en manera alguna, a los elementos que entran en la causa o que actúan como input en el proceso mismo. Como observan C. Emmeche *et al*., el concepto de emergencia sirve para explicar el mundo en términos de *niveles* o *escalas*, y no ya en un solo plano o contexto.

Más exactamente, y de manera puntual, el concepto de causalidad implica o afirma un determinada filosofía, a saber: el reduccionismo. Así, pensar causalmente equivale a pensar en reducir un fenómeno, comportamiento o dinámica a la(s) que lo explican). Todo lo contrario sucede en el contexto del concepto de emergencia. Las emergencias, propiamente hablando, apuntan hacia los desarrollos, productos o procesos subsiguientes de un sistema determinado.

En un artículo publicado originalmente en 1985 y compilado por G. Midgley, L. R. Troncale[27] identifica 33 obstáculos que enfrenta actualmente y hacia futuro el pensamiento sistémico. Dado el carácter de esta investigación, nos permitimos compilarlas a continuación. Seguidamente hacemos varios comentarios.

Obstáculos del pensamiento sistémico (los términos entre paréntesis son nuestros):

1) Hay necesidad de un vocabulario de consenso acerca de definiciones precisas con respecto a los conceptos principales empleados en la ciencia de sistemas;
2) Hay necesidad de trascender los conflictos internos al interior del campo;
3) Hay necesidad de trazar linajes a largo plazo de artículos científicos e investigadores;
4) Se hace necesario un mecanismo y motivación para llevar a cabo síntesis en la bibliografía. Hallazgos a través de las disciplinas;
5) Es necesario trascender el entrenamiento disciplinar;
6) Es necesario demostrar cualquier isomorfismo en todas las disciplinas posibles y a través de todas las escalas de los sistemas reales;
7) Es necesaria una investigación transdisciplinar adecuada de equipos (de investigadores);
8) Es necesario contrabalancear la tendencia natural a la fragmentación;
9) Es necesario incrementar dramáticamente el rigor (científico);
10) Hay de necesidad de llevar a cabo consensos que produzcan procesos y mecanismos;
11) Hay necesidad de redes mejoradas institucionales y de investigadores;
12) Es necesario crear programas educativos que respondan a las necesidades que sean del caso;
13) Son necesarios arreglos o acuerdos institucionales adecuadamente revolucionarios;
14) Es necesario emplear un conjunto pleno, mínimo de isomorfismos;
15) Se hace necesaria una taxonomía operacional de isomorfismos, sistemas, tipos y herramientas;
16) Es necesaria una especificación sistemática de nexos entre isomorfismos;
17) Se hace necesarias un conjunto auto-generativo de isomorfismos;

[27] "The Future of General Systems Research: Obstacles, Potentials, Case Studies", publicado inicialmente en *Systems Research*, vol. 21, págs. 43-84, y reproducido en G. Midgley, *op. Cit.*, págs. 231-296.

18) Se hace necesario un refinamiento empírico de isomorfismos y de proposiciones conectivas;
19) Son necesarias bases de datos acopladas a los isomorfismos y los modelos: correspondencias;
20) Hay la necesidad de una mejor metodología de investigación más específica interna al campo (de trabajo);
21) Se hacen necesarios métodos mejorados de integración y síntesis;
22) Se hace necesario reconocer que la mayoría de las técnicas de análisis sistémico se basan en un solo isomorfismo;
23) Se hace necesario resistir a un exceso de confianza de las herramientas disponibles, pero limitadas;
24) Es preciso hacer más amigable el uso de la teoría general de sistemas;
25) Se hace necesario rebajar las promesas y la retórica a favor (más bien) de las demostraciones;
26) Se hace necesario balancear y acoplar la investigación básica y sus aplicaciones;
27) Es necesario superar el foco basado en disciplinas sinónimas (o afines)[28];
28) Se hacen necesarias reglas de des-abstracción, o protocolos de correspondencia;
29) Hay necesidad de un acoplamiento más estrecho entre los modeladores de sistemas y los tomadores de decisión;
30) Se hace necesario un desarrollo detallado de criterios de descripción de una teoría general de sistemas;
31) Se hacen necesarios ejemplos en los que los modelos generales sugieran importantes nuevas hipótesis a las disciplinas;
32) Hay necesidad d volver a focalizar el criticismo interno y externo del campo (de los sistemas);
33) Hay necesidad de un liderazgo de gente joven.

A riesgo de simplificar esta lista de obstáculos, podemos reunirlos en cuatro grupos, así:

- No existe hasta la fecha una teoría de sistemas y debe poder desarrollarse, para lo cual el trabajo en detalle con isomorfismos resulta una *conditio sine qua non*
- Los enfoques sistémicos, originales de los años 1960s, resultan a la fecha (en 1985; y *a fortiori* a la fecha) un modelo agotado y que no ha tenido un relevo generacional. Los jóvenes investigadores, académicos y teóricos poco han contribuido al campo; a lo sumo hacen uso de él o lo adoptan como una cosmovisión
- Los enfoques sistémicos permanecen como eso: un gama amplia, pero dispersa de conceptos, herramientas y aproximaciones que, al cabo, terminan por reducirse a saberes circulantes y a jerga
- Predomina –crecientemente- la jerga sobre el trabajo eminentemente científico que es, a la postre, el trabajo y la investigación con demostraciones. Mucho mayor éxito tienen los enfoques sistémicos en el campo de las ciencias sociales que en el de las ciencias llamadas naturales o positivas.

[28] "*Discinyms*" es un término que acuña Troncale compuesto de: nombres *disci*-plinares paa un mismo proceso o estructura isomorfismo) que son sin-*nónimos* en términos de los sistemas generales. Hay un juego de palabras que resulta en la combinación de dos términos en uno sólo.

Como quiera que sea, un examen reflexivo acerca del estado de la cuestión elaborado con detalle por parte de Troncale resulta iluminador, relativamente a la vitalidad, el vigor y la alegría que parecen caracterizar a los trabajos en el mundo de las ciencias de la complejidad. Digámoslo de manera puntual: los enfoques sistémicos han terminado por convertirse en *ciencia normal*, y su capacidad de innovación ha sido ya cooptada por parte de los diferentes estamentos públicos, privados y de la sociedad civil. Tenemos aquí un estupendo ejemplo de cómo una teoría se sobrevive a sí misma, y lo que queda es un acumulado de términos carentes de vitalidad y de función significativa.

Finalmente, quisiéramos introducir unas distinciones importantes aunque básicas que sirven al mismo tiempo para demarcar la sistémica de la complejidad y, de pasada, para precisar el concepto mismo de "sistema".

Podemos distinguir tres clases de sistemas, así:

i. *Sistemas (o fenómenos) simples*. Son todos aquellos que se pueden explicar por vía analítica; es decir, dividiendo, fragmentando el fenómeno del caso de suerte que puede ser explicado en función de componentes o lógicas o relaciones o patrones más elementales. Inversamente, un fenómeno o sistema simple admite una explicación constructivista (o incluso reconstruccionista) y que consiste en reconstruir una dinámica o estructura a partir de las partes elementales –fundamentales por definición- identificadas. La mejor explicación de los sistemas simples es el principio de causalidad;
ii. *Fenómenos (o sistemas) complicados*. Son todos aquellos que pueden ser explicados o comprendidos a partir de la elaboración de conjuntos de los mismos fenómenos o sistemas simples. Esta clase de fenómenos (o sistemas) pueden ser explicados a través de estadísticas, estándares, promedios, análisis matriciales, vectores o fuerzas;
iii. *Sistemas (o fenómenos) complejos*. Son todos aquellos que no pueden ser explicados o comprendidos por vía reductiva (o reduccionista) ni tampoco con el recurso a cualquier clase de estadística. Esta clase de fenómenos o comportamientos operan a la manera de máquinas de Turing, y muestran, inmediatamente, ante una mirada reflexiva, el ámbito de los problemas P versus N-P. Los sistemas complejos son, *en rigor*, fenómenos, sistemas o comportamientos de *complejidad creciente* – en toda la línea de la palabra; así, por ejemplo, como complejidad informacional, o algorítmica, complejidad computacional o termodinámica, en fin, complejidad dinámica o cognitiva, se trata, siempre, en cada caso, de complejidad *creciente*.

2.2. La distinción entre ciencias de la complejidad y pensamiento complejo

Entre los neófitos de la complejidad existe, igualmente, la confusión o acaso transiciones fáciles entre las ciencias de la complejidad y el pensamiento complejo. El pensamiento complejo hace referencia, notablemente, a la obra de E. Morin y a la de sus epígonos. Es, de lejos, la comprensión más popular acerca de la complejidad entre otras razones debido al

lenguaje, verdaderamente encantador de E. Morin, a sus lúcidas intuiciones, en fin, incluso al hecho de que no posee un aparato conceptual, matemático, físico o biológico muy fuerte y a que las referencias al campo computacional o informacional –cuando existen- son sumamente amplias y vagas. En los países hispanohablantes es la comprensión más extendida sobre la complejidad y ha sido incorporada a ámbitos como la administración y la economía, la educación y los ámbitos culturales o de la psicología, incluyendo, naturalmente, a la antropología y la sociología.

Análogamente a lo advertido con respecto a la demarcación entre ciencias de la complejidad y pensamiento sistémico, en la diferenciación entre ciencias de la complejidad y pensamiento complejo no interesa aquí una presentación de lo que sea este último. Por el contrario, la atención de vuelca a continuación a establecer varios criterios de demarcación que, adicionalmente, contribuyan a la especificación acerca del estudio de los sistemas complejos caracterizados por no-linealidad, emergencia y autoorganización, por ejemplo.

El rasgo definitorio más claro del pensamiento complejo de E. Morin es que se inscribe plenamente en la mejor tradición francesa de la filosofía del sujeto (*philosophie du sujet*). Morin siempre ha pertenecido a la mejor tradición humanista y, por consiguiente, antropocéntrica, de la humanidad occidental. Sin ambages, su pensamiento se inscribe en un esfuerzo de renovación pero de continuación, al mismo tiempo, de la filosofía occidental, no obstante que su formación sea la de sociólogo. En rigor, mejor que un sociólogo o un filósofo, Morin es un *pensador* con una sólida formación y una clara preferencia por las ciencias sociales y humanas y con numerosos baches en el conocimiento de la tecnología y de campos como la biología, las matemáticas, la química o la física, por ejemplo. En el mejor de los casos, en su obra se aprecia que tiene alguna noción sobre algunos temas en estos otros campos, pero su conocimiento en materia de ciencia y tecnología es manifiestamente deficiente, por decir lo menos[29].

Mientras que la obra de Morin ha sido ampliamente reconocida en el ámbito latino (Italia, Francia, España y buena parte de América Latina), su obra permanece marginada en otros escenarios geográficos académicos y científicos. Inversamente, las ciencias de la complejidad son el objeto de trabajo e investigación de minorías en los países en los que Morin es ampliamente conocido y trabajado, notablemente en la crítica al reduccionismo científico, en el uso del holismo, en esfuerzos de desarrollo de pedagogía, en discursos epistemológicos o en análisis éticos y sociales en general.

Morin reconoce, manifiestamente la complejidad del mundo. Es más, contrapone, manifiestamente, la complejidad del conocimiento, de la naturaleza o de la vida a la

[29] El estudio más crítico sistemático sobre la obra de Morin es, sin duda, el libro de C. Reynoso, *Modelos o metáforas. Crítica del paradigma de la complejidad de Edgar Morin*, Buenos Aires, Ed. Sb, 2009. Reynoso es enfático en señalar estos elementos que acabamos de mencionar. Morin continúa empleando, no simplemente a título descriptivo o histórico, sino como un concepto actual y de plena significación, el concepto de neguentropía (véase, por ej., *Introducción al pensamiento complejo*, Barcelona, Gedisa, 1996, pág. 49), desconociendo la propia crítica que el autor de este concepto, E. Schrödinger, elabora sobre el mismo. Así, numerosos otros ejemplo podrían mencionarse sin ninguna dificultad, todo lo cual pone de manifiesta una cultura científica superficial de parte de Morin (y de los morinianos), lo cual por sí mismo no es un defecto, si no fuera por las pretensiones de conocer, dominar y hacer un sincretismo entre muchas cosas. Sin dificultad, posturas semejantes conducen inevitablemente a la afirmación del peor de los relativismos, según el cual, ante el panorama intelectual en curso, "todas las posiciones son válidas".

simplicidad de la ciencia tradicional. Para Morin, decir "complejo" equivale tanto como decir: "positivo", favorable", deseable", "mejor", o "superior" (todo esto aparece ya desde *El método I: La naturaleza de la naturaleza*), con lo cual resulta inevitable entender que existe una ambigüedad (si no una ambivalencia) a lo largo de toda la obra de Morin en cuanto que lo "complejo" se asimila fuertemente a un adjetivo o un adverbio, a una carga lingüística o incluso emocional, algo que nunca se encuentra en el mundo de las ciencias de la complejidad. Morin sabe de, por ejemplo, las fluctuaciones del mundo en general, sus turbulencias, inestabilidades, bucles, incertidumbres y emergencias[30]. Sin embargo, dadas estas dinámicas y estructuras de la realidad, Morin desarrolla *El método* como un trabajo cuidadoso, lleno de intuiciones y buenas fórmulas para modificar las relaciones del sujeto para con el mundo o, lo que es equivalente, la actitud del mundo ante la realidad y la naturaleza. En este sentido, la obra de Morin pretende exactamente lo mismo que las grandes religiones de la humanidad: la religión en general no pretende cambiar el mundo, sino, la actitud del ser humano ante el mundo, la naturaleza y ante sí mismo. Dicho de manera puntual, las religiones no quieren cambiar el mundo: les basta con cambiar el corazón humano, pues, afirman, de esta forma estarían cambiando la realidad.

La obra de Morin se ajusta sin dificultades a elementos de la Nueva Era –propios o tangenciales- tales como la ecología profunda, el tiempo profundo, el holismo de la naturaleza. Este hecho se aprecia sin dificultad alguna en el empleo de numerosos prefijos que quieren expresar bucles, relaciones y aproximaciones, ulteriormente, coherentistas a la manera del pensamiento sistémico. Se trata de prefijos tales como: epi-eco-bio-antropo-socio-retro-meta-poli-multi y muchos otros[31]. Basta con una mirada desprevenida a su obra, y de una lectura cuidadosa de El método II, para percatarse de esto. Este estilo termina afectando radicalmente el fondo, y de consuno, *malgré lui-même*, termina en una apología indirecta a aquello que era el objeto de crítica desde la obra reciente C. P. Snow, la tesis de las *dos culturas*, a saber: la ciencia, de un lado, y las humanidades, de otro. Esta indigestión, si cabe la expresión, hace que Morin, *à la limite*, termine asimilando, *sin más*, ciencia, física cuántica, filosofía, arte, ecología y biología, por ejemplo, prestándose, como un caso conspicuo, a la crítica de A. Sokal y J. Bricmont[32].

El pensamiento complejo es, *strictu sensu*, una epistemología. Frente a la complejidad de lo real, Morin elabora una crítica del "pensamiento simplificador", y plantea, con

[30] De hecho, es imposible ser medianamente sensible o inteligente en el mundo contemporáneo sin reconocer abiertamente estos atributos o características del mundo contemporáneo.

[31] En *El método IV: Las ideas. Su hábitat, su vida, sus costumbres, su organización*, Madrid, Ed. Cátedra, 1992, por ejemplo, Morin plantea la idea de una "Auto-trans-meta-sociología" (cap. V). El lenguaje se superpone a los problemas, y el entusiasmo al rigor. Recurriendo al lenguaje del giro del siglo XIX al XX, podemos decir: es éste un rasgo propio que distingue al intelectual del científico. Morin es, manifiestamente, para bien o para mal, un intelectual, no un hombre de ciencia.

[32] En los criterios de demarcación, siempre (¡siempre!) será necesario recordar el libro de Sokal y Bricmont: *Imposturas intelectuales*, Barcelona, Ed. Gedisa, 1999 (originalmente publicado en francés en 1997). Remitimos a él como a una lectura necesaria que se aplica ("le cae") tanto al pensamiento sistémico como al pensamiento complejo y, muy particularmente, a todos *los epígonos* de estas comprensiones, en las que se mezclan cibernética y sinergia, sistémica y ecología profunda, física cuántica y epistemología, por ejemplo. El tema de crítica es el más fundamental en ciencia, tecnología y filosofía en general: *el rigor científico*; por ejemplo, el rigor epistemológico, o el rigor semántico, o el rigor matemático, o el rigor computacional, entre otros. A título general, en la historia de la filosofía contemporánea, bastaría con una lectura cuidadosa de E. Husserl, *Filosofía como ciencia estricta* (*Philosophie als strenge Wissenshaft*), Buenos Aires, Ed. Nova, 1981. No sobra mencionar que el primer objeto de crítica de Husserl es el relativismo y, por consiguiente, la mezcla (fácil) de campos, temas, contextos y conceptos. Acerca de una crítica a la solución de los problemas del mundo en términos de palabras, cfr. J. L. Austin, *Cómo hacer cosas con palabras*, Barcelona, Paidós, 1991.

motivaciones políticas, sociales, morales y filosóficas, la importancia y la necesidad de un pensamiento re/innovador que, sólo él, "permitirá civilizar nuestro conocimiento"; se trata, naturalmente del llamado a y la defensa del pensamiento complejo[33].

En este sentido, existe una simbiosis, a nuestro modo de ver peligrosa por superficial, entre pensamiento sistémico, cibernética (de primero y de segundo orden, teoría de la evolución, autoorganización, epistemología y teoría de la sociedad y de la cultura, como si se tratara de elementos que encajan bien en el propósito del pensamiento complejo[34].

Quizás el más importante de los conceptos últimos de Morin sea el del denominado "principio hologramático", un término que emplea inspirándose en la obra del físico D. Bohm. Se trata, simple y llanamente, del reconocimiento de que, según Morin "el todo está en la parte que está en el todo", una expresión que no tiene absolutamente ningún valor en lógica, ya sea en la lógica matemática o simbólica (lógica formal clásica), bien en las lógicas no-clásicas.

Precisamente, en el plano de la lógica –en el sentido menos técnico, pero sí incluyente- sostiene Morin que los principios del pensamiento complejo son tres: distinción, conjunción e implicación. He aquí un caso claro en el que el lenguaje se impone sobre el pensamiento. La ignorancia de Morin acerca de la lógica es colosal. Bastaría, por ejemplo con señalar que, en referencia a la inferencia, en lógica se distinguen dos clases principales de inferencias, así: inferencias inductivas e inferencias transductivas. Sin importar por lo pronto la caracterización de cada una de estas clases, bastaría con mencionar que las inferencias transductuvas incluyen a las inferencias por igualdad, inferencias por simetría, inferencias por homología, inferencias por desigualdad, inferencias por vinculación, inferencias por referencia, inferencias por analogía; y que las inferencias inductivas comprenden la inferencia por enumeración completa, por coligación, por inducción matemática, por recurrencia, por reconstrucción, por inducción amplificadora, por muestreo, por estadística, por concordancia, por diferencia, por concordancia y diferencia, por residuo, por variaciones concomitantes. Así las cosas, ¿a qué tipo de inferencia hace referencia Morin? Este descuido termina afectando gravemente a la escuela del pensamiento complejo. Baste esta observación puntual aquí pues entrar en profundidad no solamente sería prolijo sino devastador. En el trabajo en ciencias de la complejidad en general –y notablemente en los autores que se introducen o presentan en esta investigación- no existe absolutamente ni un solo caso en el que una ligereza semejante tenga lugar.

En fin, el pensamiento de Morin es uno de esos casos en la historia de la humanidad –es decir, de la ciencia, de la filosofía, del pensamiento- en los que el buen espíritu de la obra termina destacándose sobre la letra de la misma, y en el que la intención prevalece sobre el rigor.

Como quiera que sea, es evidente que las ciencias de la complejidad son ciencia, pero no a la manera de la ciencia clásica. En la jerga de complejidad se habla –en realidad, cada vez menos- del "paradigma cartesiano-newtoniano"- para referirse a la ciencia clásica; es decir,

[33] Cfr. E. Morin, *Introducción al pensamiento complejo*, Barcelona, Gedisa, 1996, pág. 35.
[34] Véase, notablemente, op. Cit., págs. 54-59.

a la ciencia moderna. I. Prigogine ha señalado (*La nueva alianza. La metamorfosis de la ciencia*), con detalle y fineza, que la ciencia moderna constituye la extensión de la Edad Media por otros medios, y que, en realidad, la ciencia moderna todavía está impregnada del espíritu, la atmósfera, las preocupaciones, si se quiere, de la teología medieval. Hablamos de la ciencia que incluye a figuras como Vesalius, Loewenhoeckm Galileo, Descartes, Newton o Kant, entre otros.

Las ciencias de la complejidad son ciencia:

a) En el sentido del *rigor*: rigor conceptual, metodológico, matemático, computacional, sintáctico, y demás;
b) En el sentido griego de la *episteme* – un término que desborda (o abarca) a la ciencia y a la filosofía (como serían conocidas posteriormente) y que, por tanto, no se reduce ni a la ciencia ni a la filosofía;
c) Son *ciencia de frontera*, fundada en *problemas de frontera*. Así, no se trata ya de ciencia disciplinar, de ciencia que se define en el espíritu medieval, es decir: por género próximo y diferencia específica (se es médico porque no se es veterinario; se es abogado porque no se es sociólogo; se es economista porque no se es administrador, por ejemplo, y así sucesivamente).

En consecuencia, el rasgo diferenciador más claro entre las ciencias de la complejidad y el pensamiento complejo es precisamente éste, a saber: en el caso de Morin se trata de intuiciones, ideas, espíritu y propósitos que, ciertamente, no son rechazables sin más. En el caso de las ciencias de la complejidad se trata de argumentos, demostraciones, lógica(s), rigor, experimentos, modelaciones y simulaciones que han enriquecido de manera fundamental la comprensión del mundo y del universo, y que constituyen, a todas luces, una auténtica *revolución* en el conocimiento. *Con las ciencias de la complejidad se trata, evidentemente, de un avance de la ciencia, un progreso del conocimiento humano*. Con todo y el señalamiento directo e inmediato de que hablamos de progreso de la ciencia o del conocimiento humano (= *episteme*) no exclusivamente por vía de acumulación sino, además y principalmente, por vía de rupturas y discontinuidades.

2.3. La distinción entre ciencias de la complejidad y cibernética

Una distinción adicional que se impone, tiene que ver entre las ciencias de la complejidad y la cibernética. No tanto en razón a que las ciencias de la complejidad se funden, se deriven o sean hereditarias de la cibernética –lo cual difícilmente puede ser dicho de manera razonable-, sino, mejor aún, debido a que son propiamente los enfoques sistémicos y el pensamiento complejo lo que, acaso de manera indiscriminada, recurren a la cibernética como análoga o complementaria o constituyente del estudio de los fenómenos, sistemas y comportamientos caracterizados por complejidad.

La cibernética surge con el mismo espíritu que el pensamiento sistémico, el propio pensamiento complejo y que las ciencias de la complejidad, a saber: como un esfuerzo por superar las divisiones entre las ciencias y las disciplinas, como el desarrollo de un nuevo

campo en el cual confluyen tradiciones, experticias y métodos disciplinares diferentes. Desarrollada en 1948 por N. Wiener, la cibernética busca encontrar los elementos comunes que explican el funcionamiento de las máquinas automáticas y el sistema nervioso (central) humano, a partir de lo cual se lanza en la búsqueda de una teoría que abarque todo el campo del control y la comunicación en las máquinas y en los organismos vivos. Posteriormente, en 1979, H. Von Foerster desarrolla la cibernética de segundo orden o cibernética de la cibernética. La cibernética de segundo orden se articula en torno a tres ejes: la noción de observador, la de lenguaje (el lenguaje de un observador) y, en tanto que un observador emplea el lenguaje con respecto a alguien más –otro observador-, el tercer eje es el de sociedad; la sociedad que conforman los dos observadores.

Pues bien, la cibernética de segundo orden es la cibernética social, y plantea de entrada la noción de que el observador sea (un agente) autónomo.

Así pues, la cibernética (de primer orden, llamada así retrospectivamente) estudia el control y la comunicación entre máquinas y seres vivos; la cibernética de segundo orden, por tanto, estudia todos los temas sociales y, por derivación, todos aquellos atinentes a cuestiones como responsabilidad social, cooperación, acción colectiva, y otros que apuntan, ulteriormente a dominios diversos como la ética, la administración, la economía y la política.

Existe un entrelazamiento fuerte entre los enfoques sistémicos y la cibernética –de primer y de segundo orden-. Este entrecruzamiento remite a los trabajos de autores como E. Von Glaserfeld, M. Mead, R. Ashby, R. Grinker, W. McCulloch, H. Maturana, y que hacia delante o hacia atrás en el tiempo incluye también a autores como P. M. Senge, R. L. Ackoff, N. Luhmann, J. W.- Forrester, y T. Parsons[35].

Existe un trabajo que merece ser mencionado, de manera puntual, al mismo tiempo como eslabón y, contradictoriamente, como frontera entre la cibernética, por tanto también el pensamiento sistémico, y las ciencias de la complejidad. Se trata del libro escrito conjuntamente por H. Maturana y F. Varela, *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo*[36].

Este libro tiene una gran importancia por una doble razón. De un lado, es el texto que marca el origen del concepto de *autopoiesis*, y de otra parte, permite trazar claramente la división entre el pensamiento y la obra de Maturana y la de Varela; por consiguiente, entre el pensamiento sistémico y la cibernética (Maturana) y la complejidad (Varela).

Cuando se publica el libro de Maturana y de Varela, el panorama biológico estaba dominado por el texto de J. Monod *El azar y la necesidad*. Como es sabido, en él, Monod formula la necesidad del concepto de teleonomía como la clave para entender lo que son y lo que hacen los sistemas vivos. Pues bien, Maturana y Varela parten del reconocimiento de que el concepto mismo de teleonomia no solamente es altamente cuestionable –como por otra parte lo estableciera ya, por un camino distinto, F. Jacob señalando que los sistemas

[35] Cfr. G. Midgley (Ed.), *Systems Thinking. Vol. II. Systems Theories and Modelling*, Sage Publications, 2003, y G. Midgley, (Ed.), *Systems Thinking. Vol. III. Second Order Cybernetics, Systemic Therapy and Soft Systems Thinking*, Sage Publications, 2003.
[36] Buenos Aires, Ed. Universitaria y Ed. Lumen, 2004.

vivos funcionan a la manera de un bricolaje y que la noción de "programa" permite articular las diversas escalas de la vida, desde la genética hasta la organísmica[37]-; adicionalmente, poniendo énfasis en la plasticidad de la ontogenia, demuestran cómo las estructuras autopoiéticas son propias de la escala molecular, aportando así nuevas luces acerca de la comprensión acerca del origen de la vida.

A partir de estas ideas, Maturana y Varela elaboran un fresco acerca de las implicaciones biológicas, epistemológicas y gnoseológicas de la autopoesis, que es justamente el punto en el que quedan sentados los fundamentos de la autpoeisis y, al mismo tiempo, se sientan las bases para la divergencia entre Maturana y Varela: en su pensamiento y en sus relaciones personales. Sin mayores dilaciones, digamos que la tesis que sostiene F. Varela es la de que el cerebro o, para efectos del lenguaje de la cibernética, el sistema nervioso, tiene dos expresiones: la habitual y el cerebro del cuerpo; a saber: el cuerpo como una unidad que no requiere de un centro (único), sino que, por el contrario, opera por sí mismo sin el recurso a un control y comunicación centralizados: el del sistema nervioso o el del cerebro. Podemos pensar, sin ninguna dificultad que el cuerpo es un sistema de sistemas, compuesto por el sistema muscular, el sistema linfático, el sistema inmunológico, el sistema cardiovascular, el sistema digestivo, el sistema nervioso central, el sistema óseo, el sistema hormonal, el sistema reproductor, el sistema excretorio, y el sistema circulatorio.

En otras palabras, la cibernética se funda en dos nociones fundamentales, así: la idea de un observador y la noción de comunicación y de control. El observador siempre lleva a cabo una observación local (= no es posible una visión desde ninguna parte[38]), y trabajando en comunicación y control, la idea de que es necesaria una función central para ambos para que un organismo o una sociedad funcione. Ahora, es cierto que en el contexto de la cibernética de segundo orden la centralidad del control y de la comunicación se ve desplazada a un lugar secundaria gracias al reconocimiento de que puede haber, como es efectivamente l caso tanto en las máquinas como en los sistemas vivos, niveles distintos de control y escalas diferentes de comunicación. Sin embargo, es propio de la cibernética subrayar que, no obstante esta posible variedad de niveles y escalas, siempre el sistema funcionará, precisamente, de manera ***sistémica***, y por consiguiente, siempre termina por predominar un sistema de control central, a saber: el de la comunicación. A su manera, H. Maturana hablará de las interacciones de las interacciones, del lenguajear e incluso del emocionar – tres modos distintos de la idea que destacamos aquí.

Un rasgo propio de las ciencias de la complejidad en general es el hecho de que por encima de la idea de causalidad y de centralidad, reconoce de entrada y trabaja sobre ella, la idea de procesos y sistemas en paralelo, no jerarquizados, sin control central y en la que el centro emerge siempre en función de cada tarea o situación en un sistema determinado cualquiera. Esta idea resulta un tanto incómoda cuando se la ira con los ojos de la tradición. Pensar en términos de las ciencias de la complejidad significa trabajar con la ausencia de sistemas jerárquicos, con la afirmación de la ausencia de un control central rígido, en fenómenos y procesos en paralelo, atendiendo permanentemente a las sorpresas, las novedades y las

[37] F. Jacob, *La lógica de lo viviente. Una historia de la herencia*, Barcelona, Ed. Tusquets, 1999 (publicado originalmente en 1970).
[38] Empleamos aquí la expresión acuñada por Th. Nagel *The View from Nowhere*, New York/Oxford, Oxford University Press, 1986 – un libro fundamental en la filosofía de la mente.

emergencias que tienen o que pueden tener lugar, y confiando en que la robustez de un sistema estriba exactamente en la flexibilidad de las relaciones entre sus componentes o en la flexibilidad de las relaciones mismas. Esta idea ha sido trabajada en el marco de las ciencias de la complejidad atendiendo a los casos en dominios disciplinares y científicos diferentes[39].

En otras palabras, en el marco de las ciencias de la complejidad, existe un diálogo cruzado entre lo natural y lo artificial, entre elementos y estructuras bióticas y abióticas –análogamente al espíritu de la cibernética-, pero no se le da ninguna prelación –y ciertamente no a priori a la escala humana o antropocéntrica sobre cualquier otra. Los fenómenos naturales, los artificiales y los humanos[40] interactúan como dimensiones específicas de la realidad y no existe de antemano ninguna prelación –ontológica, epistemológica, axiológica u otra- de alguna sobre las demás. En contraste, la cibernética, partiendo de preocupaciones inspiradas en la física y la ingeniería, alimentándose biología y ciencias sociales, termina por reducir su espectro de trabajo a las conexiones ingeniería-sociedad. Sin forzarla, su filosofía siguen siendo eminentemente antropocéntrica o antropológica.

2.4. Recapitulando

Hemos elaborado los trazos principales de un problema difícil sobre el cual no existe (no conocemos, digamos de manera más humilde) ningún trabajo en el mundo: los criterios de demarcación en ciencias de la complejidad. Antes que delimitar un terreno, si cabe la metáfora, nos interesa desbrozar un campo.

Existen aires de familia, es indudable. Para retomar un libro popular sobre el tema, estos aires de familia incorporan a otros miembros –más próximos o más alejados de la familia, pero que tienen el mismo aire, por así decirlo, la misma herencia-, y que incluyen a la hermenéutica de G. Vattimo, o en otro espectro, a la hermenéutica de M. Beuchot que coincide en la crítica a un pensamiento único, en fin, la crítica a un pensamiento débil. Asistimos, negativamente, al final de los grandes proyectos, la crítica a los metarrelatos, la crítica al pensamiento único[41]. Tal es el aire de familia de una serie importante de autores, escuelas, metodologías y enfoques que preceden. Para ser rigurosos, tenemos que decir que la marca de nacimiento de familia es la búsqueda de la superación del dualismo que es, indudablemente, el rasgo fundamental de la humanidad occidental. Ser occidentales significa ser binarios, dualistas, maniqueos. La ciencia, la cultura, la filosofía, la religión y el arte occidentales han sido binarios o dualistas (cuando no, también, maniqueos).

Existen muy pocos autores que se hayan dado, denodadamente a la tarea de superar el dualismo. Uno de los últimos, anque incurrió en otros defectos, fue E. Husserl. Un autor

[39] Véase E. Jen (Ed.), *Robust Design. A Repertoire of Biological, Ecological, and Engineering Case Studies*, Oxford, Oxford University Press, 2005 (A Volume in the Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity).
[40] Cfr. C. E. Maldonado, "Complejidad de los sistemas sociales: un reto para las ciencias sociales", en: www.moebio.uchile.cl/36/maldonado.html
[41] Cfr. H. R. Fischer, A. Retzer, J. Schweitzer, (Comp.), *El final de los grandes proyectos*, Barcelona, Gedisa, 1997.

que trabaja en este mismo espíritu es E. O. Wilson[42]. Dicho de manera negativa, se trata de superar las dos culturas: ciencia y humanidades. De acuerdo con Husserl, mucho antes que con Descartes y Newton el dualismo se remonta a Galileo y hasta Aristóteles. Nietzsche tiene su propio diagnóstico y sitúa el origen de los males de la humanidad occidental en la Grecia clásica y en Sócrates en particular. Sin nostalgias, Nietzsche llama la atención, más bien, sobre la Grecia arcaica.

Desde otro punto de vista, existen llamados hacia una tercera cultura. Pues bien, ésta es/sería justamente aquella que bebe, que se nutre, de las ciencias de la complejidad. Entre los autores que serían representativos de la tercera cultura se encuentran S. J. Gould, B. Goddwin, L. Margulis, D. C. Dennett, F. Varela, R. Penrose, L. Smolin, M. Gell-Mann, S. Kauffman, Ch. G. Langton, entre otros[43].

Nos encontramos en medio de una revolución (científica) (Th. Kuhn). Unos, por la razones acertadas, otros sin saberlo, y otros más por la razones equivocadas, se encuentran en el bando correcto o bien el bando equivocado. En cualquier caso, hay que recordar que las condiciones de posibilidad del conocimiento son *exactamente las mismas* condiciones de posibilidad de la vida misma. Vida y conocimiento son una sola y misma cosa. Lo más grande que pueden hacer los sistemas vivos para vivir es exactamente lo más peligroso que pueden hacer: conocer. En el conocimiento va la vida misma;: está en juego la vida misma, en fin, se inauguran las posibilidades o se sientan las limitaciones e impedimentos para la vida misma.

Empleando el lenguaje de los años 1960s, mientras que el establecimiento (*establishment*) ya cooptó al pensamiento complejo y a la cibernética, aún no ha podido coptar a las ciencias de la complejidad. El conocimiento, la ciencia de punta porta el título genérico de ciencias de la complejidad. Las mejores mentes del mundo trabajan en sus campos, problemas, posibilidades. Esta investigación presenta el mundo de las ciencias de la complejidad. Sugerimos a que detrás de esta investigación haya la capacidad, por parte del lector y del estudioso de ver lo que se encuentra detrás o debajo –se trata aquí de metáforas- de los nombres, los centros, los textos, las revistas, las editoriales, las universidades y los institutos en donde se trabaja activamente en las ciencias de la complejidad; esto es, en el estudio de los sistemas, fenómenos y comportamientos de *complejidad creciente*, caracterizados por rasgos tales como *autoorganización, emergencia, no-linealidad, ausencia de control rígido, paralelismo, no centralidad, pluralismo lógico, turbulencias, inestabilidades, incertidumbre, adaptación, aprendizaje, ausencia de jerarquías, redes libres de escala, leyes de potencia*, y otros.

[42] Primero lo intentó con el texto, muy mal entendido, sobre la sociobiología; posteriormente continuó trabajando en el mismo espíritu con diferentes vehículos: E. O. Wilson, Coscilience. The Unity of Knowledge, New York, Alfred A. Knopf, 1998. "Consilience is the key to unification. I prefer this word over "coherence" because its rarity preserved its precision, whereas coherence has several possible meanings, Orly one of which is conscilience", pág. 8.

[43] Véase J. Brockman, *The Third Culture*, New York, Touchstone, 1996. Obsérvese que los autores referidos forman parte del *hard core* de las ciencias de la complejidad que sientan los pilares de esta investigación. Varias veces aparecen citados o referenciados en dominios diversos.

3. Ciencias de la Complejidad

Las ciencias de la complejidad representan una auténtica revolución en el conocimiento, al mejor estilo de las revoluciones científicas estudiadas por T. Kuhn, pero que en realidad son herederas de la tríada G. Bachelard, G. Canguilhem y A. Koyre. Se trata de un grupo de ciencias –que, por tanto, contienen numerosas teorías, una diversidad de modelos explicativos, una gama amplia de conceptos, en fin, una pluralidad de métodos y lógicas- cuyo tema de base es, para decirlo en términos genéricos: ¿Por qué las cosas son o se vuelven complejas? ¿Qué es, al fin y al cabo, "complejidad"?

A preguntas semejantes las ciencias de la complejidad no tienen una única respuesta. Este es el primero de los rasgos que las caracterizan: aportan una pluralidad de respuestas. Y sin embargo, cualquier respuesta no vale, y no todas las respuestas son equivalentes.

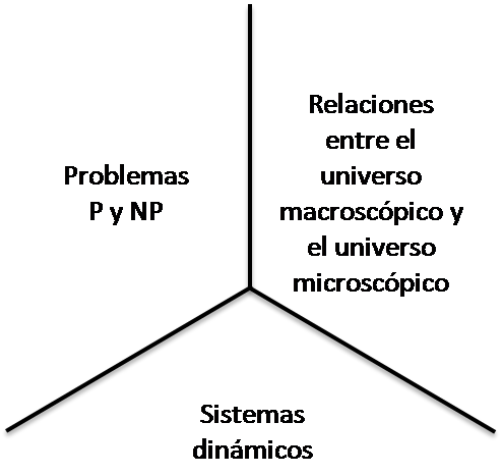
El mundo de las ciencias de la complejidad se ocupa de las *transiciones* orden/desorden; es decir, ¿por qué el orden se rompe? Y también: ¿cómo es posible que a partir del desorden sea posible el/otro orden?

Asistimos a una construcción fascinante, de muy pocos lustros hasta la fecha, unas cuantas decenas de años. Es posible caracterizar a las ciencias de la complejidad de varias maneras: así, por ejemplo, se ocupan del modo como los fenómenos, sistemas y comportamientos evolucionan y ganan grados de libertad; se trata de sistemas que ganan información aun cuando no (necesariamente) memoria; fenómenos sensibles a las condiciones iniciales, reconociendo que las condiciones iniciales apuntan siempre al presente –en cada caso dado- y que no deben ser confundidas con algo así como "condiciones originarias"; fenómenos que se encuentran en redes –libres de escala, por ejemplo- y cuya topología es esencialmente variable.

No existe, sin embargo, una sola "definición" de complejidad. Al respecto, vale siempre recordar que la buena ciencia –como de hecho también la buena filosofía- no parte de definiciones ni trabaja tampoco con definiciones. Si acaso, arriba, al cabo, a definiciones. La buena ciencia trabaja con problemas. Y aquí el problema es "complejidad". De esta suerte, el estudio de los sistemas, fenómenos y comportamientos que se caracterizan por complejidad creciente corresponde exactamente a aquella clase de situaciones en las que una pluralidad (multiciplicidad o diversidad; que es la marca distintiva de la complejidad) no puede ser reducida de ninguna manera a un momento anterior, a una instancia inferior, en fin, a un multiplicidad más elemental o simple. Entonces, con total seguridad, nos

encontramos de cara a los temas, problemas, campos, fenómenos y sistemas que conciernen específicamente a las ciencias de la complejidad.

El esquema 5 contiene los tres grandes ejes de trabajo en ciencias de la complejidad. Prefigura, por así decirlo el mapa –esencialmente abierto- del mundo de la complejidad. Ellos son (el orden no importa): la teoría matemática de la complejidad –más propiamente conocida como el conjunto de los problemas P versus N-P, las relaciones entre el universo microscópico y el universo macroscópico, y la teoría de los sistemas dinámicos.



Esquema 5. Ejes de trabajo de las ciencias de la complejidad. Esquema realizado por los autores.

Acerca de las relaciones entre el universo microscópico y macroscópico –que constituye, por lo demás, el tema mismo de una de las lógicas no-clásicas (la lógica cuántica)-, es fundamental atender al hecho de que aquí no se trata tanto de magnitudes y tamaños cuanto que de las relaciones entre tiempos. Por ejemplo, escalas nanoscópicas o femtoescalares relativamente a kilómetros o años o siglos.

Estos tres grandes ejes se cruzan entre sí e inauguran el mundo mismo de la complejidad.

3.1. Libros de recuentos periodísticos acerca de ciencias de la complejidad

El periodismo científico cumple, indudablemente, una función fundamental en las sociedades democráticas. Hay países, como Inglaterra, notablemente, en donde las discusiones sobre ciencia están ya tan arraigadas que incluso hay espacio para la presentación de la *mala ciencia* (*bad science*). Las universidades de Inglaterra tienen espacios sobre la mala ciencia, e incluso periódicos muy serios como *The Guardian* disponen de un espacio diario o semanal para ello: para discutir uno de los problemas más difíciles en ciencia: los criterios de demarcación, o también, la pseudo-ciencia.

Lo libros referidos inmediatamente son trabajos periodísticos sobre complejidad. Los hay sumamente serios, como el libro de Waldrop o el de Gleick. Y altamente peligrosos por generalistas y acaso superficiales en numerosos aspectos como el de Horgan.

El libro de Waldrop es ya un clásico que traza los orígenes –humanos, administrativos, teóricos, educativos y de investigación del Instituto Santa Fe, en Nuevo México-. En su trabajo, Waldrop deja ver los cruces entre factores biográficos, culturales y teóricos en la constitución del primer instituto de investigación independiente, de carácter mixto, en el mundo. Por su parte, el libro de Gleick tiene una importancia análoga para el nacimiento del caos: primero teoría, luego ciencia. El libro de Gleick es el primero en una serie, siempre brillante, de estudios periodísticos, biográficos y de divulgación sobre la historia de la ciencia y la tecnología, siempre con un rigor encomiable.

***

Gleick, J. (1987). *Caos: La Creación de una Ciencia.* Barcelona: Seix Barral

Horgan, J. (1998). *El Fin De La Ciencia: los Límites del Conocimiento en el Declive de la Era Científica.* Barcelona: Paidós

Johnson, S. (2003). *Sistemas Emergentes: O que Tienen en Común Hormigas, Neuronas, Ciudades y Software*. Madrid: Turner

Lewin, R. (1992). *Complexity: Life at the Edge of Chaos.* New York: Collier Books

Waldrop, M. (1992). *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. New York: Simon and Schuster

3.2. Artículos clásicos o fundacionales sobre complejidad y ciencias de la complejidad

La ciencia contemporánea se escribe en artículos científicos (*papers*). Tal es la tradición que se remonta, con seguridad, a los cinco famosos artículos del año maravilloso de A. Einstein (1905). Anteriormente la ciencia se hacía en forma de libros. Desde entonces prevalece la idea acerca de la importancia de la publicación de artículos en revistas prestigiosas. No es incluso banal mencionar que numerosas hojas de vida de científicos –ingenieros y filósofos incluidos- actualmente incluyen la mención del tipo: "autor de más de 100 publicaciones científicas", o: "Ha publicado más de 200 artículos en revistas indexadas", y otras semejantes. A esta tendencia existen excepciones notables, siendo quizás la más importante en el marco de las ciencias de la complejidad el libro de B. Mandelbrot que da origen a los fractales. La cienciometría en general viene a reforzar positivamente esta tendencia en la historia de los aportes novedosos a la ciencia en general.

Hemos compilado a continuación los artículos inmediatamente más relevantes para el mundo de las ciencias de la complejidad; artículos pioneros, fundacionales. Todos se

encuentran disponibles en la web –tanto en buscadores serios como en bases electrónicas-, y numerosas veces han sido publicados en compilaciones y antologías clásicas.

Para un conocimiento fundamental acerca del estado del arte en complejidad es imposible no haber leído y trabajado estos artículos. O al contrario, dicho de manera positiva: una formación sólida en complejidad pasa por conocer y haber trabajado estos artículos. Ellos son la *conditio sine qua non* para un adecuado conocimiento acerca de las especificidades, algunas de las más importantes categorías y conceptos, en fin, la apertura a una dimensión anteriormente totalmente desconocida.

Quizás habríamos podido incluir aquí algunos de los artículos que, indirectamente, sientan las bases de la complejidad. Artículos de Gauss o de Poincaré, de Riemann o de Hilbert, por ejemplo. Pasamos por alto acerca de un criterio tan abierto e impreciso: por esta razón se encuentran aquí los autores que forman parte del *hard core* de la complejidad.

***

Anderson, P. W., (1972). "More id Different". *Science, 117 (4047)*, 393-396

Arrow, K.J., (1962). "The Economic Implications of Learning by Doing". *Review of Economic Studies 80*,155-173.

Arthur, B., (1989). "Competing Technologies, Increasing Returns and Lock-in by Historical Events". *Economic Journal, 99*, 106-131

Arthur, B., (1995). "Complexity in Economic and Financial Markets". *Complexity, 1*, 20-25

Arthur, B., (1996). "Increasing Returns and the New World of Business". *Harvard Business Review, 74 (4)*, 100-109

Arthur, B., (1999). "Complexity and the Economy". *Science 284*, 107-109

Bak P., Tang C., and Weisenfeld K., (1988). "Self-Organized Criticality". *Physical Review A 38*, 364-374

Bennett, C., (1973). "Logical Reversibility of Computation". *IBM Journal of Research and Development 17 (6)*,525-532.

Chaitin, G., (1966). "On the Length of Programs for Computing Finite Binary Sequences". *Journal of the ACM 13*,547-569.

K. Gödel, (1930). "On formally Undecidable Propositions of Principia Mathematica and Related Systems". Original en alemán publicado en: *Monatshefte für Mathematik und Physik, 38*, 173-198

Gould, S., and Eldredge, N., (1977). "Punctuated Equilibria: the Tempo and Mode of Evolution Reconsidered". *Paleobiology 3 (2)*, 115-151.

Holland, J., and Reitman, J., (1977). “Cognitive Systems Based on Adaptive Algorithms”. *SIGART Newsletter (63)*, 49.

Kolmogorov, A., (1965). “Three Approaches to the Quantitative Definition of Information”. *Problems of Information and Transmission 1 (1)*,1-7.

Langton, C. (1986). “Studying Artificial Life with Cellular Automata”. *Physica D: Nonlinear Phenomena 22 (1-3)*, 120-149

Lorenz, E. (1963). “Deterministic Nonperiodic Flow”. *Journal of the Atmospheric Sciences, 20*, 130-141

Rosenblueth, A., & Wiener, N., (1945).” The Role of Models in Science”. *Philosopy of Science, 12 (4)*, 316-321.

Simon, H., (1973). “The Organization of Complex Systems”. In *Hierarchy Theory*, (H. Pattee Ed.). New York: George Braziller.

Shannon, C., (1948). “A Mathematical Theory of Communication”. *Bell System Technical Journal 27*, 379-423 623-656.

Turing, A., (1950). “Computing Machinery and Intelligence”. *Mind, New Series, 59 (236)*, 433-460.

Turing, A., (1952). “The Chemical Basis of Morphogenesis”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences 237 (641)*, 37-72.

Von Neumann, J. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata.* (A. Burks, Ed.) Urbana Ill.: University of Illinois Press.

Weaver, W., (1948). “Science and Complexity”. *American Scientist, 36*, 536-544

Wolfram, S. 1984. “Universality and Complexity in Cellular Automata”. *Physica D 10*, 1-35.

Wolfram, S. (1986). “Approaches to Complexity Engineering”. *Physica D 22*, 385-399

3.3. Textos panorámicos, clásicos e introductorios sobre complejidad

Existe una dificultad para el acceso a las ciencias de la complejidad. Se trata del hecho de que la inmensa mayoría de la bibliografía se encuentra en inglés –en contraste, notablemente con la bibliografía sobre “pensamiento complejo” (E. Morin), que ya ha sido traducida al español (y que numerosos epígonos de Morin son hispanohablantes). Pero, con seguridad, por encima de esta circunstancia, es el hecho de que el lenguaje de las ciencias

de la complejidad aún está altamente permeado por conceptos, herramientas, enfoques provenientes de las matemáticas, de la física, de la química, la biología y los sistemas computacionales principalmente.

La razón principal para esta circunstancia –ineludible- estriba en el hecho de que las ciencias de la complejidad nacieron y durante un tiempo largo se alimentaron de las ciencias más sólidas, con mayor prestigio, las más seguras y con mejores apoyos de diverso tipo. Pero es igualmente cierto que las ciencias de la complejidad vienen abriéndose, rápidamente, a las llamadas ciencias sociales y humanas. En contextos hispanohablantes, en general, en los que la formación en ciencia y en pensamiento abstracto (matemáticas, lógica) no siempre son los mejores, el acercamiento a las ciencias de la complejidad se hace más difícil. Por esta razón, particularmente entre académicos de las llamadas ciencias sociales y humanas y entre otros que se caracterizan por una excesiva especialización o, por el contrario, por ser generalistas, el atractivo del pensamiento complejo y de los enfoques sistémicos resulta más atractivo por lo fácil.

Ya lo decía H. Pagels: las ciencias de la complejidad se desarrollaron a partir de las ciencias naturales y/o positivas debido, sencillamente, a que los sistemas físicos son los más simples que hay y de una complejidad bastante menor al de las ciencias sociales y humanas.

3.3.1. Bibliografía en español

No existe hasta la fecha ningún libro de introducción global a las ciencias de la complejidad. Dado el panorama que precede, se entenderá fácilmente la dificultad. En el medio universitario y académico francés, la editorial P.U.F. (Presses Univesitaires de France), tienen una serie de libros estupendos de introducción: *Que sais-je?* La editorial alemana *Wissenschaftliche Buchgesellschaft* tiene una serie de libros de introducción a diversos temas de muy alta calidad. Pues bien, en español no existe nada semejantehasta el momento. Sin embargo, los libros referidos a continuación constituyen una buena introducción a las ciencias de la complejidad. En español, la Editorial Tusquets ha cumplido un trabajo más que admirable en la divulgación de la ciencia y, notablemente, en la publicación de libros sobre complejidad. Entre los títulos editados por esta editorial se encuentra libros de fondo (algún libro de S. Kauffman) y de divulgación de muy buen nivel. La deuda de la comunidad de complejólogos que no dominan el inglés para con Tusquets es grande. Los textos marcados con un asterisco (*) refieren textos que, pese a ser introductorios, tienen un carácter técnico y por tanto son de más difícil comprensión. La ventaja de la lista que sigue a continuación es que en la mayoría de casos se trata de libros escritos por teóricos e investigadores en ciencias de la complejidad de primera línea.

***

Briggs y Peat, (1999). *Las siete leyes del caos*. Barcelona: Tusquets.

Fernández Díaz, A., (1994). *La economía de la complejidad. Economía dinámica caótica*. Madrid: McGraw Hill

R. García, 2006, *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona: Gedisa

Gell-Mann, M., (1996). *El quark y el jaguar. Aventuras en lo simple y lo complejo*. Barcelona: Tusquets

Gribbin, J., (2006). *Así de simple. El caos, la complejidad y la aparición de la vida*. Barcelona: Crítica

Maldonado, C.E., (2005a). ¿En qué sentido puede hablarse de diálogo de las ciencias? Acerca de las nuevas ciencias de la complejidad". *Revista de la Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales*, 29 (112), 417-428

Maldonado, C.E., (2005b) "Ciencias de la complejidad: Ciencias de los cambios súbitos". *Odeón. Observatorio De Economía y Operaciones Numéricas* (Universidad Externado de Colombia), 85-125

Maldonado, C.E., (2004) "¿Qué son las ciencias de la complejidad?". *Zero 13*, Universidad Externado de Colombia, 106-111

Maldonado, C.E., (2003a). "El problema de la filosofía del conocimiento y el estudio de los sistemas complejos". *Praxis Filosófica 17*, Universidad del Valle, 103-120

Maldonado, C.E., (2003b). "Marco teórico de trabajo en ciencias de la complejidad y siete tesis sobre la complejidad". *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, IV (8 y 9), 139-154

Maldonado, C.E., (Ed.), (2001). *Visiones sobre la complejidad*. Bogotá: Universidad El Bosque (2ª Edición)

Mandelbrot, B., (1990). *Geometría de fractales*. Barcelona: Tusquets (*)

Mandelbrot, B., (1996). *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*. Barcelona: Tusquets (*)

Maturana, H., Varela, F., (1990). *El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del conocimiento humano*. Madrid: Debate (*)

Murphy y O´Neill (eds.), (1999). *La biología del futuro*. Barcelona: Tusquets (*)

Nicholis, G. & Prigogine, I., (1987). *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*. Madrid: Alianza Editorial (*)

Pagels, H., (1991). *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona: Gedisa

Prigogine, I., (1993). *El nacimiento del tiempo*. Barcelona: Tusquets

Prigogine, I., (1993). *¿Tan sólo una ilusión? Una exploración del caos al orden*. Barcelona: Tusquets

Prigogine, I., (1999). *Las leyes del caos*. Barcelona: Crítica (*)

Prigogine, I., (1997). *El fin de las certidumbres*. Santiago de Chile: Ed. Andrés Bello

Prigogine, I., Stengers, I., (1983). *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza

Stewart, I., (1998). *De aquí al infinito*. Barcelona: Crítica/Drakontos

Stewart, I., y Golubitsky, M., (1995). *¿Es Dios un geómetra?* Barcelona: Crítica

Wagensberg, J., (1994). *Ideas acerca de la complejidad del mundo*. Barcelona: Tusquets

3.3.2. Bibliografía en inglés

En contraste con la situación en español sí existen libros más integrales y sólidos de introducción a las ciencias de la complejidad en inglés. A continuación se mencionan varios que tienen, con todo, un énfasis particular. Digamos más bien otra cosa: la siguiente bibliografía es absolutamente fundamental para un trabajo serio en investigación sobre complejidad. Ellos son la *conditio sine qua non* del trabajo en complejidad. Análogo a la sección anterior, los textos técnicos son marcados con un asterisco (*).

***

Atreya, C. E., (2004). *Invisible Cities. A Metaphorical Adaptive System*. Ann Arbor: Festina Lente

Axelrod, R., (1984). *The Evolution of Complexity*. New York: Basic Books

Axelrod, R., (1997). *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton, NJ: Princeton University Press (*)

Axelrod, R., and Cohen, M., (1999). *Harnessing Complexity. Organizational Implications of a Scientific Frontier*. New York: The Free Press (*)

Badii, R., and Politi, A., (1997). *Complexity. Hierchical Structures and Scaling in Physics*. Cambridge University Press (*)

Bak, P., (1996). *How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Springer Verlag (*)

Baofu, P. (2007). *The Future of Complexity: Conceiving a Better Way to Understand Order and Chaos*. Singapore: World Scientific

Bar-Yam, Y., (1997). *Dynamics of Complex Systems*. Addison-Wesley (*)

Bar-Yam, Y. (2004). *Making Things Work. Solving Complex Problems in A Complex World*. NECSI-Knolwedge Press

Barabási, A.-L., (2002). *Linked. How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*. Plume – Penguin Books

Bertuglia C.S. & Vaio F. (2005). Nonlinearity, Chaos, and Complexity: The Dynamics of Natural and Social Systems. Oxford: Oxford University Press (*)

Bird, R. J., (2003). *Chaos and Life. Complexity and Order in Evolution and Thought*. New York: Columbia University Press

Bossomaier, T., Green, D., (1998). *Patterns in the Sand. Computers, Complexity, and Everyday Life*. Reading, MA: Perseus Books

Casti., J., (1990). *Paradigms Lost. Tackling the Unanswered Mysteries of Modern Science*. New York: Avon Books

Casti, J., (1985). *Nonlinear System Theory*. Orlando, FL. Academic Press (*)

Casti, J., (1995). *Complexification. Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*. New York: Harper

Cilliers, P., (1998). *Complexity and Postmodernism: Understanding Complex Systems*. London: Routledge

Cohen, J., and Stewart, I., (1994). *The Collapse of Chaos. Discovering Simplicity in a Complex World*. Penguin Books

Cowan, G., Pines, D., Melzter, D., (eds.), (1999). *Complexity. Metaphors, Models, and Reality*. Ca,bridge, MA: Perseus Books (*)

Chaisson, E. J., (2001). *Cosmic Evolution. The Rise of Complexity in Nature*. Harvard University Press

Erdi, P. (2008). *Complexity Explained*. Berlin: Springer-Verlag (*)

Gros, C. (2008). *Complex and Adaptive Dynamical Systems: A Primer*. Berlin: Springer-Verlag (*)

Hayles, N. K., (Ed.), (1991). *Chaos and Order. Complex Dynamics in Literature and Science*. Chicago and London: The University of Chicago Press

Holland, J., (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems. An Introdyctory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press (*)

Holland, J., (1995). *Hidden Order. Haw Adaptation Buids Complexity*. Reading, MA: Perseus Books (*)

Holland, J., (1998). *Emergence. From Chaos to Order*. Reading, MA: Addison-Wesley

Johnson, N. (2007). *Two's Company, Three is Complexity: A simple guide to the Science of all Sciences*. Oxford: Oneworld

Kauffman, S., (1993). *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford University Press (*)

Kauffman, S., (1995). *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*. Oxford University Press (*)

Kauffman, S., (2000). *Investigations*. Oxford University Press (*)

Kellert, S. H., (1993). *In the Wake of Chaos. Unpredictable Order in Dynalical Systems*. Chicago/London: The University of Chicago Press

Mainzer, K. (2007). *Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind and Mankind* (Quinta ed.). Berlin: Springer Verlag.

Mitchell, M. (2009). *Complexity: A Guided Tour.* Oxford: Oxford University Press.

Morowitz, H. J., (2002). *The Emergence of Everything. How the World Became Complex*. Oxford: Oxford University Press

Nicolis, G., & Nicolis, C. (2007). *Foundations of Complex Systems: Nonlinear Dynamics, Statistical Physics, Information and Prediction.* Singapore: World Scientific (*)

Novak, M. A., (2006). *Evolutionary Dynamics. Exploring the Equations of Life*. Cambrdge, MA and London: The Belnap Press of Harvard University Press (*)

Penrose, R., (1990). *The Emperor´s New Mind. Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. London: Vintage

Penrose, R., (1994). *Shadows of the Mind. A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford: Oxford University Press (*)

Prigogine, I., (1980). *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Psysical Sciences*. San Francisco: W. H. Freeman and Co. (*)

Rae, A., (1998). *Quantum Physics: Illusion or Reality?* Cambridge: Cambridge University Press

Rescher, N., (1998). *Complexity. A Philosophical Overview*. New Brunswick (U.S.A.) and London (U.K.): Transaction Publishers

Resnick, M., (1997). *Turtles, Termites, and Traffic Jams. Explorations in Massively Parallel Microworlds*. Cambridge, MA/London: The MIT Press

Richardson, K. A., Goldstein, J. A., Allen, P. M., Snowden, D., (Eds.), (2005). *Emergence, Complexity and Organization. E:CO ANNUAL, Vol. 6*. Mansfield, MA: ISCE

Sastry, S., (1999). *Nonlinear Systems. Analysis, Stability, and Control*. Springer Verlag (*)

Schneider, E. D., and Sagan, D., (2005). *Into the Cool. Energy Flow, Thermodynamics, and Life*. Chicago and London: The University of Chicago Press

Scott, A. C., (2007). *The Nonlinear Universe. Chaos, Emergence, Life*. Berlin: Springer-Verlag

Solé, R., Bascompte, J., Delgado, J., Luque, B., & Manrubia, S. (1996). Complejidad en la Frontera del Caos. *Investigación y Ciencia* , 14-21.

Strevens, M., (2003). *Bigger than Chaos. Understanding Complexity through Probability*. Cambridge, MA/London: Harvard University Press

Waldrop, M., (1992). *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Chaos*. New York: Simon & Schuster

Watts, D., (2003). *Six Degrees. The Science of a Connected Age*. New York: W. W. Norton & Co.

Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Champaign: Wolfram Research (*)

Zimmerli, W. Ch., & Sandbothe, M., (1993). *Klassiker der modernen Zeitphilosophie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft

Zurek, W. H., (Ed.), (1990). *Complexity, Entropy and the Physics of Information*. Perseus Books (*)

3.4. Textos técnicos sobre diversos aspectos de la complejidad

En el proceso de crecimiento y consolidación de una ciencia (en este caso de las ciencias de la complejidad) hay una doble circunstancia relacionada con la dinámica de sus publicaciones. De un lado, se trata de la publicación de libros panorámicos, introductorios y de divulgación, cuestión que suele darse, principalmente, durante los primeros años de vida del campo. Lo que hasta aquí se ha mostrado es justamente eso. Sin embargo, de otro lado, se trata de la publicación de textos que profundizan en aspectos particulares del campo, en sus problemas o conceptos relevantes, en sus líneas y proyectos de investigación o que vislumbran, simplemente, nuevos problemas, retos u horizontes de cara al futuro del

campo. Se trata, en muchos casos, de textos altamente técnicos o de compilaciones[44] de textos, igualmente técnicos, sobre un tema o problema puntual, o sobre un conjunto de ellos. Esta sección recopila una muestra, por demás pequeña, aunque con suerte relevante, de este tipo de trabajos.

Particularmente, hay un fenómeno que es absolutamente imposible de omitir y que, mejor aún, merece un lugar por sí mismo. Se trata de la Enciclopedia de Complejidad, editada por R. Meyers, que se menciona en la bibliografía que se presenta a continuación. Ciertamente algo más de la mitad de la Enciclopedia no es sobre complejidad en el sentido riguroso de la palabra. La mayor parte corresponde a enfoques sistémicos.

Es evidente que existe un parentesco fuerte entre áreas como la cibernética (de primer y de segundo orden), los enfoques sistémicos, el pensamiento complejo y las ciencias de la complejidad. Pero es igualmente manifiesto que es necesario trabajar en un criterio de demarcación –una expresión que la filosofía de la ciencia remonta hasta los trabajos pioneros de Reichenbach, por ejemplo-. Nosotros nos encontramos trabajando en este criterio. Pero es tema de otro texto aparte. Pero es tema de otro texto aparte. Por lo pronto, baste el segundo capítulo de esta investigación.

***

Albeverio, S., Andrey, D., Giordano, P. & Vancheri, A. (Eds.). (2008). *The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach*. Heidelberg: Physica-Verlag

Armbruster, D., Kaneko, K. & Mikhailov, A., (2005). *Networks of Interacting Machines: Production Organization in Complex Industrial Systems and Biological Cells*. World Scientific Leture Notes in Complex Systems Vol. 3. Singapore: World Scientific

Aste, T., Di Matteo, T. & Tordesillas, A., (Eds.), (2007). *Granular and Complex Materials*. World Scientific Lecture Notes in Complex Systems Vol. 8. Singapore: World Scientific

Balanov, A., Janson, N., Postnov, D., & Sosnovtseva, O. (2009). *Synchronization From Simple to Complex*. Berlin: Springer-Verlag

Chaisson, E. J., (2001). *Cosmic Evolution. The Rise of Complexity in Nature*. Harvard, MA/London: Harvard University Press

Denier, J. & Frederiksen, J., (Eds.), (2007). *Frontiers in Turbulence and Coherent Structures*. World Scientific Lecture Notes in Complex Systems Vol. 6. Singapore: World Scientific

Ivancevic, V. & Ivancevic, T., (2008). *Complex Nonlinearity: Chaos, Phase Transitions, Topology Change and Path Integrals*. Berlin: Springer-Verlag

Ivancevic, V. & Ivancevic, I. (2007). *Complex Dynamics: Advanced System Dynamics in Complex Variables*. Berlin: Springer-Verlag

[44] Estas suelen ser, en muchas ocasiones, el resultado de conferencias internacionales.

Jen, E., (Ed.), (2005). *Robust Design: ARepertoire of Biological, Ecological and Engineering Case Studies*. Oxford: Oxford University Press.

Meyers, R. (Ed.). (2009). *Encyclopedia of Complexity and Systems Science.* New York: Springer-Verlag.

McDaniel, R. & Driebe, D. J., (Eds.), (2005). *Uncertainty and Surprise in Complex Systems: Questions on Working with the Unexpected*. Understanding Complex Systems. Berlin: Springer-Verlag

Minai, A. & Bar-Yam, Y. (Eds.). (2008). *Unifying Themes in Complex Systems IV: Proceedings of the Fourth International Conference on Complex Systems*. Berlin: Springer-Verlag

Minai, A. & Bar-Yam, Y. (Eds.). (2006). *Unifying Themes in Complex Systems IIIA: Overview: Proceedings of the Third International Conference on Complex Systems*. Berlin: Springer-Verlag

Minai, A. & Bar-Yam, Y. (Eds.). (2006). *Unifying Themes in Complex Systems IIIB: New Research: Proceedings of the Third International Conference on Complex Systems*. Berlin: Springer-Verlag

Schimansky-Geier, L., Fiedler, B., Kurths, J. & Schöll, E., (Eds.), (2007). *Analysis and Control of Complex Nonlinear Processes in Physics, Chemistry and Biology*. World Scientific Lecture Notes in Complex Systems Vol. 5. Singapore: World Scientific

Schuster, A. (Ed.). (2008). *Robust Intelligent Systems*. Berlin: Springer-Verlag

Schuster, H. G., (2008). *Reviews of Nonlinear Dynamics and Complexity*. Berlin: Wiley-VCH Verlag

Shan, Y. & Shan, A. (2008). *Applications of Complex Adaptive Systems*. Hershey: IGI Publishing

Shats, M. & Punzmann, H., (Eds.), (2006). *Lecture Notes on Turbulence and Coherent Structures in Fluids, Plasmas and Nonlinear Media*. World Scientific Lecture Notes in Complex Systems Vol. 4. Singapore: World Scientific

Zhou, J. (Ed.). (2009). *Complex Sciences: First International Conference, Complex 2009, Shanghai, China, February 23-25, 2009*. Berlin: Springer-Verlag

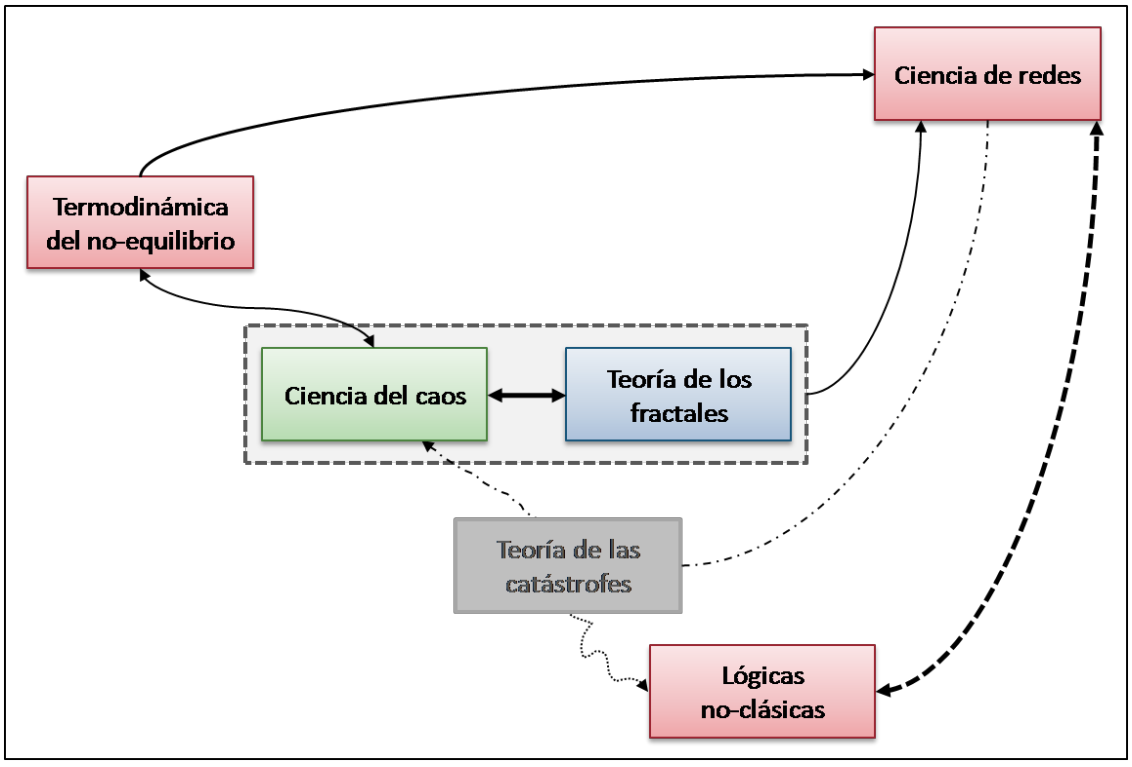
3.5. Estado actual de las ciencias de la complejidad

Originalmente, las ciencias de la complejidad eran –aritméticamente- seis, incluyendo la hipótesis que venimos trabajando según la cual las lógicas no-clásicas son una de las ciencias de la complejidad. Pues bien, el esquema 6 tiene la función de mostrar,

actualmente, más allá de la enumeración o presentación general de las ciencias de la complejidad, el estado actual del trabajo y de la investigación en este campo.

Las ciencias que aparecen en rojo –termodinámica del no-equilibrio (TNE), ciencia de redes y las lógicas no-clásicas son aquellas que dominan, si cabe la expresión, el trabajo de los complejólogos. Existe una implicación recíproca muy fuerte entre caos y fractales. Sin embargo, ambas han llegado a integrarse en la termodinámica del no equilibrio. Es como decir que actualmente no existen proyectos de investigación o libros serios o artículos sobre caos. La ciencia del caos, por así decirlo, ya dio lo que podía dar (excepto por un campo aún en exploración, que es el caos no-determinsita o también, el caos cuántico; un área sobre la que se encontraba trabajando I. Prigogine en el momento de su fallecimiento). Y precisamente por ello ha llegado a subsumirse en la TNE. Esta afirmación, sin embargo, merece matizarse cuando se piensa en el caos cuántico y subcuántico, un tema que permanece abierto hasta la fecha, en espera de una mejor o mayor cristalización.

La teoría de catástrofes desaparece debido a la fuerza lógica del caos –tomando lógica en el sentido de la filosofía de la ciencia-, y prácticamente ha desaparecido como teoría matemática. En cuanto lenguaje, sencillamente llega a integrarse o a subsumirse en las lógicas no-clásicas (LNC) – por razones obvias.



Esquema 6. Estado actual de las ciencias de la complejidad. Esquema realizado por los autores.

La doble flecha puntuada entre la LNC y la ciencia de redes hace referencia, en el estado actual de la investigación, a una relación indirecta. Por el contrario, existe una relación directa entre la TNE y la ciencia de redes. Por lo demás, una parte de la ciencia del caos y de los fractales han llegado también a incluirse en la ciencia de redes, como se aprecia, sin

dificultad del estudio de percolaciones, fenómenos de cascadas, y las relaciones entre teoría de grafos, topología y redes complejas.

En cualquier caso, este esquema debe ser tomado como un mapa de las ciencias de la complejidad que contiene, en su base, territorios irregulares tanto como valles, si cabe la metáfora. Las relaciones directas e indirectas en el marco de las ciencias de la complejidad apuntan precisamente al estado de la investigación actualmente.

3.5.1. Complejidad y termodinámica del no equilibrio

Cronológicamente, la primera de las ciencias de la complejidad fue la termodinámica del no-equilibrio, desarrollada por I. Prigogine. En sentido estricto la termodinámica clásica y la termodinámica del no-equilibrio son una sola y misma ciencia que comprende dos momentos: el clásico, que pivota alrededor de la noción de equilibrio –y por tanto, ulteriormente, de muerte-, y la nueva –cuyo centro es el no-equilibrio, y en consecuencia la vida-. Las contribuciones de la TNE abarcan desde la física y la química a la biología y los sistemas sociales humanos. Arrojan nuevas y poderosas luces acerca tanto del origen de la vida como sobre la lógica de los sistemas vivos, superando con creces el concepto de "neguentropía" acuñado por E.Schrödinger.

***

Gell-Mann, M. & Tsallis, C., (Eds.), (2004). *Nonextensive Entropy. Interdisciplinary Applications*. Oxford: Oxford University Press

Kondepudi, D. e I. Prigogine, (1998). *Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipitave Structures*. John Wiley & Sons

Nicholis, G., e I. Prigogine, (1977). *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*. New York: Wiley-Interscience

Nicholis, G., y Prigogine, I. (1994). *La Estructura de lo Complejo. En el Camino Hacia una Nueva Comprensión de las Ciencias*. Madrid: Alianza

Prigogine, I., (1962). *Nonequilibrium Statistical Mechanics*. New York: Wiley

Prigogine, I., (1977). *Nobel Lecture in Chemistry. Time, Structure and Fluctuations*, s.d.

Prigogine, I., (1980). *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*. San Francisco: W. H. Freeman & Co.

3.5.2. Complejidad y caos

Históricamente, el caos –primero teoría, luego ciencia-, fue desarrollada por E. Lorenz en los años 1962-64. Pero hubieron de pasar muchos años para que fuera reconocida su importancia. Esta historia está muy bien narrada por J. Gleick. El estudio central del caos estriba en la identificación de atractores extraños (un concepto acuñado por D. Ruelle). Inicialmente el caos permanece como una teoría de sistemas deterministas. Al cabo del tiempo, su interés se vuelca hacia el caos indeterminista o subcuántico. En el marco del estudio de los comportamientos caóticos los atractores fijos y periódicos sirven como grupos de control, por así decirlo, puesto que la atención se enfoca en los atractores extraños. Puntualmente dicho, los atractores responden a sistemas diferenciales.

***

Briggs y Peat, (1999). *Las siete leyes del caos*. Barcelona: Tusquets

Cohen, J. & Stewart, I. (1994). *The Collapse of Chaos*. New York: Penguin Books

Cramer, F. (1993). *Chaos and Order: The Complex Structure of Living Systems*. New York: VCH Publishers

Cushing, J. M., Costantino, R. F., Dennis, B., Desharnais, R. & Henson, S., (2003). *Chaos in Ecology: Experimental Nonlinear Dynamics*. San Diego: Academic Press

Gleick, J. (1987). *Caos: La Creación de una Ciencia.* Barcelona: Seix Barral.

Kellert, S. (1993). *In the Wake of Chaos: Unpredictable Order in Dynamical Systems*. Chicago: Chicago University Press

Li, Z., Halang, W., & Chen, G. (2006). *Integration of Fuzzy Logic and Chaos Theory.* Berlin: Springer-Verlag.

Lorenz, E. (1993). *The Essence of Chaos*. Seattle, WA: University of Washington Press

Ruelle, D. (1991). *Chance and Chaos*. Princeton, NJ: Princeton University Press

Sengupta, A., (Ed.), (2006). *Chaos, Nonlinearity, Complexity: The Dynamical Paradigm of Nature*. Berlin: Springer-Verlag

3.5.3. Complejidad y fractales

La geometría de fractales es, históricamente hablando, la tercera de las ciencias de la complejidad. Existe una fuerte implicación recíproca entre caos y fractales. La razón es que todo atractor extraño tiene en su base una dimensión fractal. Los fractales han resultado de inmensa ayuda en la medición de numerosos sistemas y comportamientos, en ciencias de la salud y economía, en sistemas sociales y en astronomía, por ejemplo.

***

Barnsley, M. (1993). *Fractals Everywhere*. Segunda edición. Cambridge, MA.: Academic Press

Mandelbrot, B., (1996). *Los objetos fractales*. Barcelona: Tusquets

Mandelbrot, B., (1997). *La geometría fractal de la naturaleza*. Barcelona: Tusquets

Mandelbrot, B. & Hudson, R. (2006). *Fractales y Finanzas: Una Aproximación Matemática a los Mercados: Arriesgar, Perder y Ganar*. Metatemas 93. Barcelona: Tusquets

Wagensberg, J. (2004). *La Rebelión de las Formas. O Cómo Perseverar Cuando la Incertidumbre Aprieta* (segunda ed.). Barcelona: Tusquets.

3.5.4. Complejidad y catástrofes

La teoría de catástrofes nace y permanece vinculada durante un tiempo largo a un campo desarrollado también por R. Thom, el cobordismo. Hay que decir que en cuanto teoría matemática, la teoría de catástrofes prácticamente desaparece. La razón es que, relativamente al caos, resulta una teoría muy costosa – en términos de G. de Ockahm. En efecto, mientras que el caos trabaja los sistemas dinámicos con base en tres conceptos – atractores fijos, atractores periódicos y atractores extraños- la teoría de catástrofes proponía siete modelos fundamentales. "Catástrofe" es el término empleado para designar sencillamente cambios súbitos, imprevistos, irreversibles. A pesar de que desaparece como una teoría matemática, Thom mismo expresa que la teoría permanece como un *lenguaje*, a saber: el lenguaje que expresa o en el que se estudian cambios súbitos e irreversibles.

***

Thom, R., (1990). *Esbozo de una semiofísica. Física Aristotélica y Teoría de las Catástrofes*. Barcelona: Gedisa

Thom, R., (1997). *Estabilidad Estructural y Morfogénesis. Ensayo de una Teoría General de los Modelos*. Barcelona: Gedisa

Thom, R., (1985). *Parábolas y Catástrofes.* Barcelona: Tusquets

Zeeman, E. C., (1977). *Catastrophe Theory. Selected Papers, 1972-1977.* Reading, MA: Addison Wesley Publishing Co

3.5.5. Complejidad y redes

La ciencia de redes complejas, desarrollada originariamente por D. Watts, L. Barabasi y S. Strogatz entre los años 2001 y 2003, constituye la quinta de las ciencias de la complejidad. Un rasgo fundamental de las ciencias de la complejidad estriba exactamente en este punto: a la pregunta "qué es complejidad" o "por qué sucede la complejidad", por ejemplo, las ciencias de la complejidad no aportan –en marcado contraste con la ciencia clásica- una sola respuesta. Por el contrario, se aportan diversas respuestas. Lo que es importante tener en cuenta, sin embargo, es que no es verdad que cualquier respuesta sea posible o aceptada.

Digamos, *en passant*, que no por ser caotólogo o por trabajar en redes complejas, por ejemplo, se es entonces necesariamente complejólogo. Pero al trabajar en complejidad entonces si es posible atravesar por termodinámica del no-equilibrio, caos, fractales, catástrofes o redes complejas.

De manera genérica, y sin embargo, muy puntual, la pregunta rectora en el contexto del estudio de las redes complejas no es ya, por primea vez en la historia: ¿Qué tan grande y amplio es el mundo?, sino: ¿Cuáles son los grados de distancia que separan a un punto de partida cualquiera de un *target* determinado? Pues bien, la teoría establece que son seis grados de separación o menos.

***

Barabási, A.-L., (2003). *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*. Plume

Barrat, A., Barthélemy, M., Vespignani, A., (2008). *Dynamical Processes on Complex Networks*. Cambridge: Cambridge University Press

Ganguly, N., Deutsch, A., & Mukherjee, A. (Eds.), (2009). *Dynamics On and Of Complex Networks: Applications to Biology, Computer Science and the Social Sciences*. Boston: Springer-Birkhauser

Gross, T. & Sayama, H. (Ed.). (2009). *Adaptive Networks: Theory, Models and Applications*. Berlin: Springer-Verlag

Johnson, N., (2007). *Two´s Company, Three is Complexity. A Simple Guide to the Science of All Sciences*. Oxford: Oneworld

Kocarev, L. & Vattay, G. (Eds.), (2005). *Complex Dynamics in Communication Networks*. Berlin: Springer-Verlag

Newman, M., Barabási, A.L. & Watts, D., (2006). *The Structure and Dynamics of Networks*. Princeton, NJ: Pronceton University Press

Reichardt, J. (2009). *Structure in Complex Networks*. Berlin: Springer Verlag

Solé, R. (2009). *Redes Complejas: del Genoma a Internet.* Barcelona: Tusquets.

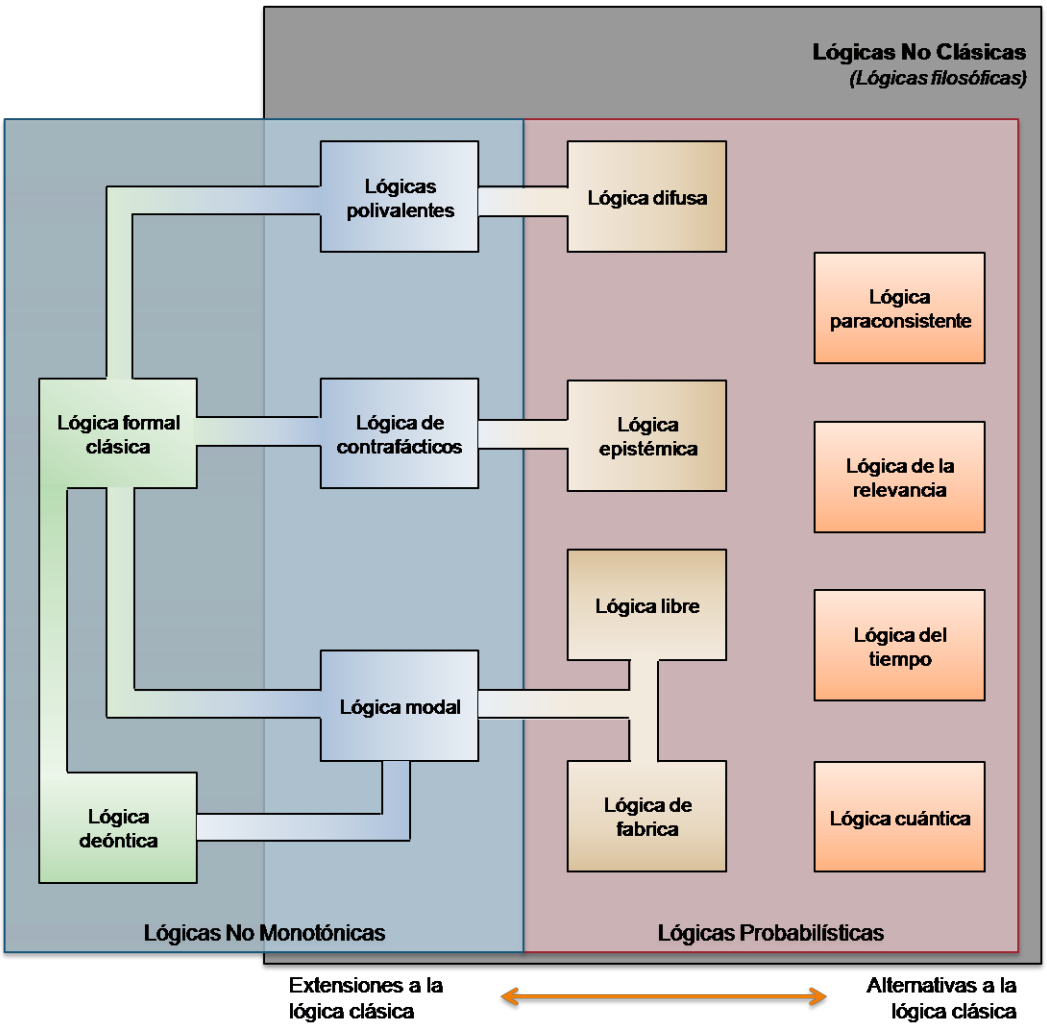
Strogatz, S., (2003). *Sync. How Order Emerges from Chaos in the Universe, Nature, and Daily Life*. New York: Theia

Watts, D. J., (2003). *Six Degrees. The Science of a Connected Age*. New York/London: W. W. Norton & Co.

Wu, C. W. (2007). *Synchronization in Complex Networks of Nonlinear Dynamical Systems*. Singapore: World Scientific

3.5.6. Complejidad y lógicas no-clásicas

La ciencia en general siempre ha estado acompañada de, o se ha fundado, en (la) lógica. Sin embargo, en el contexto de las ciencias de la complejidad hablamos de y trabajamos con lógicas no-clásicas. El esquema 7 brinda una visión de las más destacadas de ellas y sus relaciones entre sí.



Esquema 7. Lógicas no clásicas (o lógicas filosóficas). Esquema realizado por los autores.

Cabe mencionar que la lógica formal clásica es la lógica matemática o la lógica simbólica, que nace entre 1847 y 1936, con los trabajos de G. Boole y A. De Morgan, hasta Tarski, pasando por las contribuciones de Peano y Frege, entre otras. Antes de esta época, la lógica no existe y permanece como un apéndice de la metafísica. El nacimiento de la lógica independientemente del cuerpo de la filosofía da lugar a la lógica como ciencia –autónoma, independiente-. Dicho de manera genérica, las lógicas no-clásicas nacen, en unos casos, debido a que los procesos de formalización de la lógica formal eran demasiado estrechos, y en otros, por el contrario, debido a que eran demasiado laxos.

Las lógicas no clásicas ponen, de entrada, claramente sobre la mesa, a plena luz del día, una idea escandalosa cuando se la mira con los ojos de la tradición occidental: no hay una única lógica de la verdad (*there is no one true logics*). Ahora bien, ningún autor lo ha establecido de esta manera: presentamos la hipótesis según la cual las lógicas no-clásicas son una de las ciencias de la complejidad. Esta hipótesis cuenta ya con algunos avances de parte nuestra.

***

Beal, J. C., and Restall, G., (2006). *Logical pluralism*. Oxford: Oxford University Press

Gardies, J.-L., (1979). *Lógica del tiempo*. Madrid: Paraninfo

Haack; S., (1996). *Deviant Logic, Fuzzy Logic. Beyond the Formalism*. Chicago and London: The University of Chicago Press

Hintikka, J., (2007). *Socratic Epistemology. Explorations of Knowledge-Seeking by Questioning*. Cambridge: Cambridge University Press

Jaquette, D., (Ed.), (2007). *A Companion to Philosophical Logic*. Blackwell Publishing

Kyburg, Jr., H. E., and Teng, Ch. M., (2001). *Uncertain Inference*. Cambridge: Cambridge University Press

Mares, E. D., (2007). *Relevant Logic. A Philosophical Interpretation*. Cambridge: Cambrdige University Press

Palau, G., y colaboradores, (2004). *Lógicas condicionales y razonamiento de sentido común*. Buenos Aires: Gedisa-UBA

Palau, G., (2002). *Introducción filosófica a las lógicas no-clasicas*. Buenos Aires: Gedisa-UBA

Peña, L., (1993). *Introducción a las lógicas no clásicas*. México: UNAM

Priest, G., (2008). *An Introduction to Non-Classical Logic*. Cambrdige: Cambridge University Press

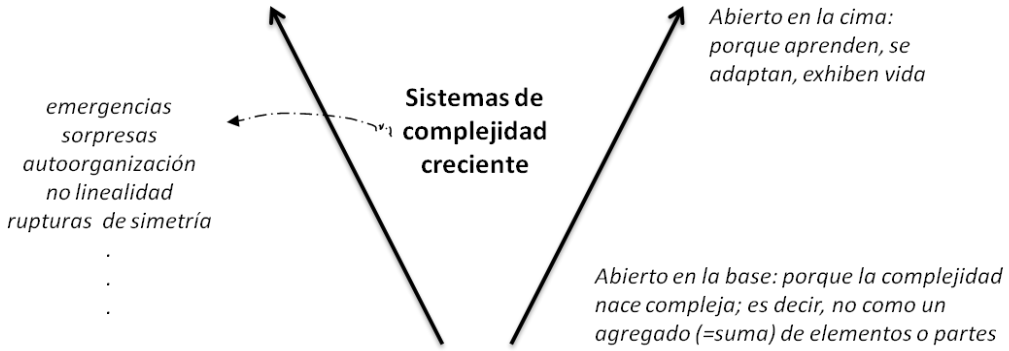
Prior, A. N., (2003). *Papers on Time and Tense*. Oxford: Oxford University Press

Woods, J., (2003). *Paradox and Paraconsistency. Conflict Resolution in the Abstract Sciences*. Cambridge: Cambridge University Pres

3.6. Emergencia y auto-organización

Indudablemente, los conceptos de emergencia y de autoorganización constituyen pilares fundamentales de las ciencias de la complejidad. Diversos autores, antes que (pre)suponerlos como conceptos o categorías de complejidad, se han dado a la tarea de explicar exactamente en qué consiste la emergencia y cómo surge y qué hace la autoorganización. Los dos autores más destacados en este sentido son J. Holland y S. Kauffman.

Dicho de manera negativa, las ciencias de la complejidad no trabajan con base en el principio de causalidad (y ni siquiera de multicausalidad; por ejemplo, con estudios multivariados). La causalidad permanece como un patrimonio de la ciencia y la filosofía clásicas. Sin embargo, dicho de manera positiva o afirmativa, los sistemas de complejidad creciente tanto contienen como apuntan hacia emergencias, adaptaciones, sorpresas y autorganización (esquema 8).



Esquema 8. Evolución de los sistemas de complejidad creciente. Esquema realizado por los autores.

***

Aziz-Alaoui, M. A. & Bertelle, C., (Eds.), (2006). *Emergent Properties in Natural and Artificial Dynamical Systems*. Understanding Complex Systems. Berlin: Springer-Verlag

Aziz-Alaoui, M. A. & Bertelle, C., (Eds.). (2009). *From System Complexity to Emergent Properties*. Berlin: Springer-Verlag

Bedau, M. & Humphreys, P. (Eds.). (2008). *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science*. Cambridge, MA: MIT Press

Bertelle, C., Duchamp, G. & Kadri-Dahmani, H. (Eds.). (2009). *Complex Systems and Self-Organization Modelling*. Berlin: Springer-Verlag

Camazine, S., Deneubourg, J.L., Franks, N., Sneyd, J., Theraulaz, G. and Bonabeau, E. (2003). *Self-organization in Biological Systems*. Princeton: Princeton University Press.

Davies, P. (Ed.). (1989). *The New Physics*. New York: Cambridge University Press

Fromm, J. (2004). *The Emergence of Complexity*. Kassel: Kassel University Press

Gregersen, N., (Ed.), (2003). *From Complexity to Life: On the Emergence of Life and Meaning*. Oxford: Oxford University Press

Haken, H. (2006). *Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Tercera edición. Berlin: Springer-Verlag

Hemelrijk, C. (2005). *Self-organisation and Evolution of Social Systems*. Cambridge: Cambridge University Press

Holland, J. (1998). *Emergence. From Chaos to Order*. Reading, MA: Addison-Wesley

Holland, J. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading, MA: Perseus Books

Ishiwata, S. & Matsunaga, Y. (Eds.). (2008). *Physics of Self-Organization Systems*. Singapore: World Scientific

Johnson, S. (2003). *Sistemas Emergentes: O que Tienen en Común Hormigas, Neuronas, Ciudades y Software*. Madrid: Turner

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

Kauffman, S. (1995). *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization*. Oxford: Oxford University Press

Kauffman, S. (2000). *Investigations*. Oxford: Oxford University Press

Kelso, J.A., (1995). *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press

Lucas, K. & Roosen, P., (Eds.), (2010). *Emergence, Analysis and Evolution of Structures: Concepts and Strategies Across Disciplines*. Understanding Complex Systems. Berlin: Sprnger-Verlag

Manrubia, S., Mikhailov, A. & Zanette, D., (2004). *Emergence of Dynamical Order: Synchronization Phenomena in Complex Systems*. World Scientific Lecture Notes in Complex Systems Vol. 2. Singapore: World Scientific

Morowitz, H., (2002). *The Emergence of Everything: How the World Became Complex*. Oxford: Oxford University Press

Nicolis, G., and Prigogine, I., (1977). *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. New York: John Wiley & Sons

Nijhout, H. F., Nadel, L. & Stein, D., (Eds.), (1997). *Pattern Formation in the Physical and Biological Sciences*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Reading: Addison-Wesley Publishing

Prokopenko, M. (Ed.). (2008). *Advances in Applied Self-organizing Systems*. Berlin: Springer-Verlag

Walleczek, J., (Ed.), (2000). *Self-Organized Biological Dynamics and Nonlinear Control: Toward Understanding Complexity, Chaos and Emergent Function in Living Systems*. Cambirdge: Cambridge University Press

3.7. Complejidad y sistemas cuánticos

Los sistemas de complejidad creciente se fundan en la física cuántica en general y en la mecánica cuántica en particular, y ello por una razón fundamental, a saber: el modelo clásico –Galileo, Copérnico, Kepler y Newton- ya está cerrado y nada nuevo puede ser incluido en él. Esto significa exactamente que la mecánica clásica ha sido incluida, como un momento particular en la teoría de la relatividad, de un lado, y además y principalmente en el modelo cuántico. El conocimiento del mundo físico dirige su mirada hacia el vórtice en el que, se cree, habrán de confluir la relatividad y la cuántica, que es en una teoría de la gravitación cuántica.

Permanece el problema del tiempo –algo que es fundamental en complejidad y que en lña física cuántica, sin embargo, permanece aún como un tema inconcluso-. Pero este ya es un problema aparte. Una de las aristas hacia la que la comunidad de investigadores está volviendo la mirada en este aspecto es el de la biología cuántica y, por consiguiente, *a fortiori*, las ciencias de la complejidad.

***

Abbott, D., Davies, P. & Pati, A., (Eds.), (2008). *Quantum Aspects of Life*. Singapore: Imperial College Press

Baets, W., (2006). *Complexity, Learning and Organizations: A Quantum Interpretation of Business*. New York: Routledge

Benatti, F., (2009). *Dynamics, Information and Complexity in Quantum Systems*. Berlin: Springer-Verlag

Hirvensalo, M., (2004). *Quantum Computing*. Natural Computing Series. Segunda edición. Berlin: Springer-Verlag

Lloyd, S. (2006). *Programming the Universe: a Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*. New York: Alfred A. Knopf

Nedjah, N., dos Santos, L. & de Macedo, L., (Eds.), (2008). *Quantum Inspired Intelligent Systems*. Berlin: Springer-Verlag

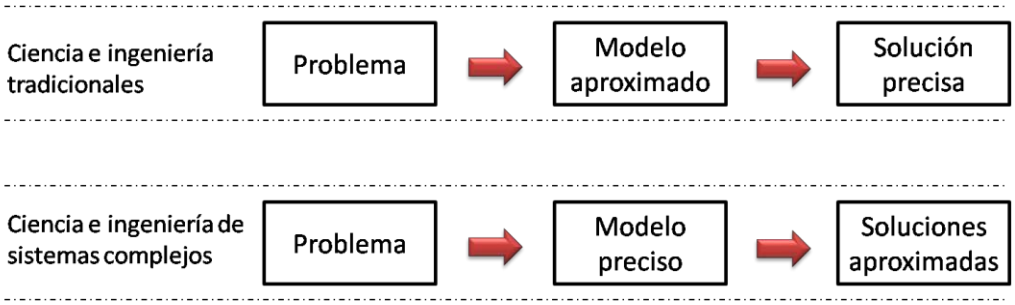
3.8. Modelamiento y simulación de sistemas complejos

El modelamiento y (sobre todo) la simulación son específicos de los sistemas de complejidad creciente[45]. Esta idea requiere aún una incorporación y una elaboración por parte de quienes se inician en el estudio y el trabajo en profundidad con la complejidad.

En el plano tradicional de la ciencia, la construcción de modelos y la ulterior solución de problemas consistió en la elaboración de un modelo aproximado, capaz (en apariencia) de simplificar y contener una realidad, al cual le correspondía siempre, en cada ocasión, una solución única. El fundamento de este tipo de modelamiento se basó, por ejemplo, en la mecánica clásica, la lógica formal clásica, el cálculo, las ecuaciones diferenciales o la geometría euclidiana. Pues bien, pese a que este tipo de modelos suele admitir soluciones precisas (=exactas), estas últimas se corresponden usualmente con el modelo, pero no con el problema real al que se refieren. Es así como la ciencia clásica nos llevó, cada vez más, a una sobresimplificación de la realidad como la forma única de comprensión y actuación sobre el mundo.

En el marco de las ciencias de la complejidad la idea es completamente contraria (esquema 9). Se trata de construir un modelo del problema que se tiene entre manos tan preciso como sea posible, por ejemplo, a través de técnicas tales como los autómatas celulares, el modelamiento y la simulación basados en agentes o los modelos bio-inspirados (incluidas las metaheurísticas). Un modelo semejante permite obtener no una sino *varias* soluciones referidas no al modelo (que está ajustado tanto como se puede a la realidad) sino al problema real que se está abordando. Se habla entonces de múltiples soluciones o, dicho técnicamente, de un espacio de soluciones. El modelamiento planteado en estos términos permite abordar fenómenos complejos sin la necesidad eliminar la incertidumbre ni de linealizarlos.

[45] Ciertamente, en el sentido más amplio e incluyente de la palabra, el modelamiento se ha empleado en toda la historia de la ciencia, sólo que en el contexto de la complejidad toma matices diferentes y nuevos. De otro lado, y pese a que se pueden simular fenómenos y dinámicas simples, la simulación cobra realmente sentido cuando de sistemas complejos se trata.



Esquema 9. Modelamiento clásico versus modelamiento en el contexto de las ciencias de la complejidad. Adaptado y ampliado desde (Michalewicz et al., 2007)

***

Axelrod, R., (1997). *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton, NJ: Princeton University Press

Awrejcewicz, J. (Ed.). (2009). *Modeling, Simulation and Control of Nonlinear Engineering: State-of-the-Art, Perspectives and Applications*. Berlin: Springer-Verlag

Bandini, S., Chopard, B. & Tomassini, M., (Eds.), (2002). *Cellular Automata: 5th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2002, Geneva, Switzerland, October 9-11, 2002, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

Bandini, S., Manzoni, S., & Vizzari, G. (2009). "Agent Based Modeling and Simulation". In R. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 184-197). Berlin: Springer-Verlag.

Barandiaran, X., & Moreno, A. (2007). "Modelos Simulados, Mediación Virtual para el Pensamiento Complejo: Lecciones Filosóficas desde la Vida Artificial". *IAS-Research* , 1-7.

Billari, F., Fent, T., Prskawetz, A. & Scheffran, J. (2006). *Agent-Based Computational Modelling: Applications in Demography, Social, Economic and Environmental Science*. Berlin: Physica-Verlag

Boccara, N. (2004). *Modeling Complex Systems*. Berlin: Springer-Verlag.

Bock, H., Kostina, E., Phu, H. & Rannacher, R. (Eds.). (2006). *Modeling, Simulation and Optimization of Complex Systems*. Berlin: Springer-Verlag

Bonabeau, E. (2002). "Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems". *Proc. National Academy of Sciences , 99* (3), 7280-7287.

Codd, E. F., (1968). *Cellular Automata*. New York: Academic Press

Ehrentreich, N. (2008). *Agent-Based Modeling: The Santa Fe Institute Artificial Stock Market Model Revisited*. Berlin: Springer-Verlag

El Yacoubi, S., Chopard, B. & Bandini, S., (Eds.), (2006). *Cellular Automata: 7th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2006, Perpignan, France, September 20-23, 2006, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

Engquist, B., Lötstedt, P. & Runborg, O. (Eds.). (2009). *Multiscale Modeling and Simulation in Science*. Berlin: Springer-Verlag

Gilbert, N. & Troitzsch, K. (2005). *Simulation for the Social Scientist*. Berkshire: Open University Press

Gintis, H., (2000). *Game Theory Evolving. A Problem-Centered Introduction to Modeling Strategic Interaction*. Princeton, NJ: Princeton University Press

Griffeath, D. & Moore, C., (Eds.), (2003). *New Constructions in Cellular Automata*. Santa Fe Institute in the Sciences of Complexity. Oxford: Oxford University Press

Halgamuge, S., & Wang, L. (Eds.). (2005). *Computational Intelligence for Modelling and Prediction.* Berlin: Springer-Verlag.

Ilachinski, A. (2001). *Cellular Automata: a Discrete Universe.* Singapore: World Scientific.

Ilachinsky, A. (2004). *Artificial War: Multiagent-Based Simulation of Combat.* Singapore: World Scientific.

Ioannou, P. & Pitsillides, A. (Eds.). (2008). *Modeling and Control of Complex Systems*. Boca Raton: CRC Press

Macal, C. (2009). "Agent Based Modeling and Artificial Life". In R. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 112-131). New York: Springer-Verlag.

Maldonado, C. E., & Gómez Cruz, N. (2010). *Modelamiento y Simulación de Sistemas Complejos (Cuaderno de trabajo).* Bogotá: Universidad del Rosario.

Miller, J. & Page, S., (2007). *Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life*. Princeton Studies in Complexity. Princeton: Princeton University Press

Pagels, H. (1991). *Los Sueños de la Razón: El Ordenador y los Nuevos Horizontes de las Ciencias de la Complejidad.* Barcelona: Gedisa.

Ríos Insúa, D., Ríos Insúa, S., Jiménez, J. M., Jiménez Martín, A., (2009). *Simulación. Métodos y aplicaciones*. México: Alfaomega, 2ª Edición

Schiff, J. (2008). *Cellular Automata: a Discrete View of the World.* Honoken, NJ: John Wiley & Sons.

Sloot, P., Chopard, B. & Hoekstra, A., (Eds.), (2004). *Cellular Automata: 6th International Conference on Cellular Automata, for Research and Industry, ACRI 2004, Amsterdam, The Netherlands, October 25-27, 2004, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

Sidney, Y. & Diaz de la Rubia, T., (Eds.), (2009). *Scientific Modeling and Simulations*. Berlin: Springer-Verlag

Terano, T., Kita, H., Kaneda, T., Arai, K. & Deguchi, H., (Eds.), (2005). *Agent-Based Simulation: From Modeling Methodologies to Real-World Applications. Post-Proceedings of the Third International Workshop on Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems 2004*. Berlin: Springer-Verlag

Toffoli, T. & Margolus, N., (1987). *Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling*. Cambridge, MA: MIT Press

Umeo, H., Morishita, S., Nishinari, K., Komatsuzaki, T. & Bandini, S., (Eds.), (2008). *Cellular Automata: 8th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2008, Yokohama, Japan, September 23-26, 2008, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

Wagensberg, J. (2003). *Ideas sobre la Complejidad del Mundo. Colección Fábula.* Barcelona: Tusquets.

4. Complejidad y sistemas vivos

El fenómeno de máxima complejidad conocida en el universo son, sin lugar a dudas, los sistemas vivos –la vida. No sin razón J. Maddox señalaba que los tres problemas últimos de la investigación científica y filosófica son: el conocimiento del origen y la estructura de la materia, el conocimiento acerca del origen y la naturaleza de la vida, y el problema de las relaciones mente-cerebro. La vida es una especie de materia que no se reduce a simple materialidad; por lo menos no hasta que sepamos qué es la materia; y por tanto, las relaciones con la antimateria, así como las relaciones de la energía con la energía oscura del universo. Las relaciones mente-cerebro son pertinentes para un tipo de vida: supuesta la escisión, básica, entre organismos sésiles y móviles. Estamos en los umbrales del estudio de las relaciones entre vida y complejidad.

Con seguridad, los dos problemas fundamentales en el estudio de los sistemas vivos son los relativos al origen de la vida, tanto como lo que hace que los sistemas vivos sean tales, es decir, su lógica. Muchos se ha avanzado en el primer plano, pero el segundo problema es el que presenta los desarrollos más sólidos.

El estudio de la vida en general implica de entrada el reconocimiento de que existen dos formas principales de sistemas vivos, así: la vida natural, cuya física es el Carbono, y cuya química se basa en la Tabla de Elementos Periódicos, y la vida artificial, cuya física es el Silicio y cuya química incluye a los Algoritmos Genéticos. La primera apunta hacia la naturaleza en su sentido primero; la segunda a la naturaleza creada, genéricamente, por el ser humano y en particular por la ciencia, la tecnología y el arte.

***

Abbott, D., Davies, P. & Pati, A., (Eds.), (2008). *Quantum Aspects of Life*. Singapore: Imperial College Press

Andrade, E., (2003). *Los demonios de Darwin*. Bogotá: Ed. Unibiblos

Blasius, B., Kurths, J. & Stone, L., (Eds.), (2007). *Complex Population Dynamics: Nonlinear Modeling in Ecology, Epidemiology and Genetics*. World Scientific Lecture Notes in Complex Systems Vol. 7. Singapore: World Scientific

Cushing, J. M., Costantino, R. F., Dennis, B., Desharnais, R. & Henson, S., (2003). *Chaos in Ecology: Experimental Nonlinear Dynamics*. San Diego: Academic Press

Goodwin, B. (1999). *Las manchas del leopardo : La evolución de la complejidad.* Barcelona: Tusquets.

Gregersen, N., (Ed.), (2003). *From Complexity to Life: On the Emergence of Life and Meaning*. Oxford: Oxford University Press

Gribbin, J., (2006). *Así de simple. El caos, la complejidad y la aparición de la vida*. Barcelona: Crítica

Kaneko, K. (2006). *Life: An Introduction to Complex Systems Biology*. Berlin: Springer-Verlag

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

Kauffman, S., (1995). *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization*. Oxford: Oxford University Press

Kauffman, S., (2000). *Investigations*. Oxford: Oxford University Press

Maldonado, C. E., (2009). "Significado y alcance de pensar en sistema vivos". *Thelos 4*, Revista electrónica, Universidad Tecnológica Metropolitana del Estado de Chile.

McDermott, J., Samudrala, R., Bumgarner, R., Montgomery, K. & Ireton, R. (Eds.). (2009). *Computational Systems Biology*. New York: Humana Press

Mitchell, S. D., (2003). *Biological Complexity and Integrative Pluralism*. Cambridge: Cambridge University Press

Solé, R., & Goodwin, B., (2000). *Signs of Life: How Complexity Pervades Biology*. New York: Basic Books

Stewart, I. (1999). *El Segundo Secreto de la Vida.* Barcelona: Crítica.

Varela, F. (2000). *El Fenómeno de la Vida*. Santiago de Chile: Dolmen

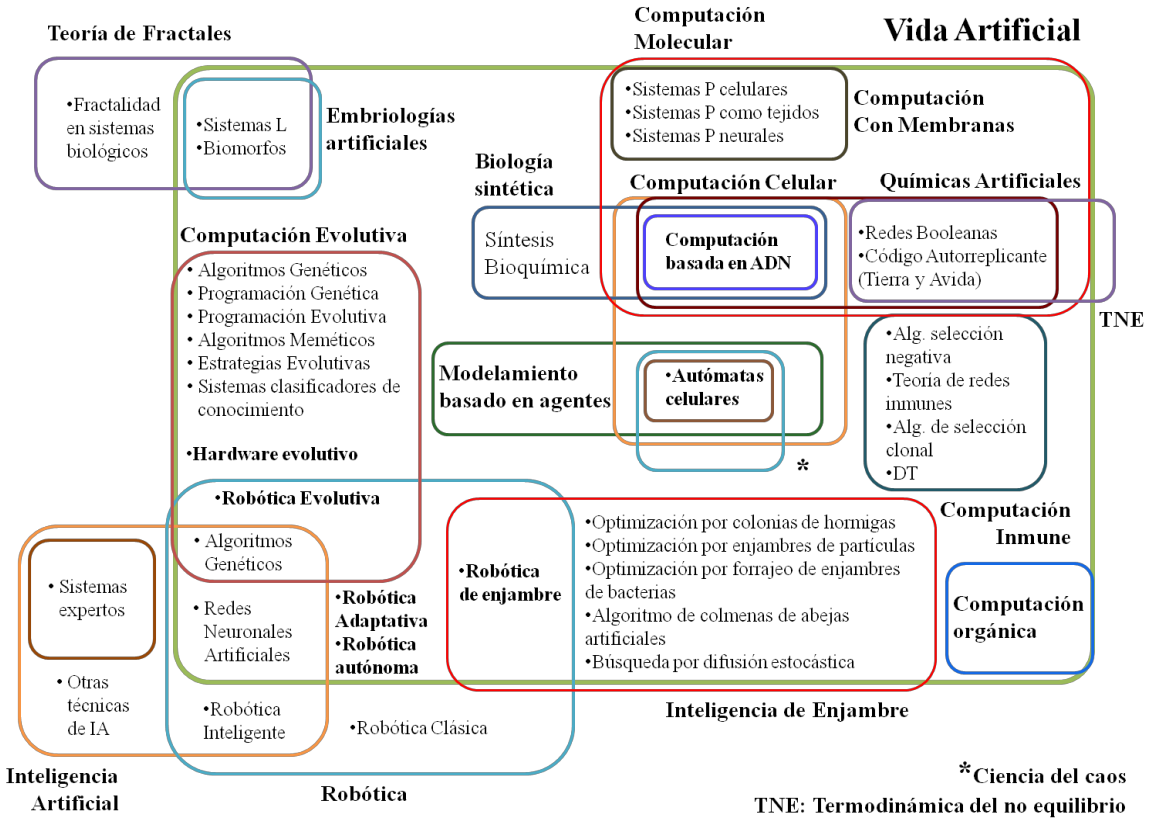
4.1. Modelamiento y simulación de sistemas biológicos, sistemas inspirados biológicamente y vida artificial

Dentro del modelamiento y la simulación en general, hay tres fenómenos conspicuos que brillan con luz propia: los sistemas biológicos, los sistemas inspirados en la biología y la vida artificial. Cabe incluso –y en eso hemos venido trabajando- sostener la hipótesis de que la vida artificial puede y debe ser comprendida como una de las ciencias de la complejidad.

Históricamente, desde su nacimiento, las ciencias de la complejidad han trabajado, integrado e impulsado activamente dos campos de trabajo paralelos: los algoritmos genéticos (J. Holland), y la vida artificial (Ch. Langton). El nexo entre ambos es el interés manifiesto por la forma en que los sistemas inspirados biológicamente contribuyen a comprender la vida en el planeta, tanto como a prefigurar la vida posible; algo que en el lenguaje técnico se designa como la-vida-tal-y-como-podría-ser (*life-as-it-could-be*). El crecimiento en este campo es sostenido, sólido y creciente.

Pero la vida artificial no trata única ni exclusivamente de construir modelos y realizar simulaciones. La vida artificial trabaja en tres planos complementarios: i) el modelamiento y la simulación de sistemas biológicos (sección actual), ii) la construcción de sistemas (acaso ingenieriles) capaces de evolucionar, aprender y adaptarse en entornos cambiantes (capítulo 6) y iii) el estudio de las capacidades de cómputo de los sistemas biológicos y su implementación como nuevas arquitecturas y modelos de computación (capítulo 7).

Un panorama amplio y a la vez una síntesis propuesta de la investigación y el trabajo en vida artificial son presentados en el esquema 10. Allí se muestra la multiplicidad de líneas de investigación, metodologías y enfoques propios de la vida artificial, así como algunas de sus relaciones con campos cruzados y cercanos como la inteligencia artificial y la teoría de fractales. Cada uno de los sub-campos de la vida artificial es, por sí sólo, una línea de investigación en crecimiento constante.



Esquema 10. Síntesis de la investigación en vida artificial. Esquema realizado por los autores.

***

Abbass, H., Bossomaier, T., & Wiles, J. (Eds.). (2005). *Recent Advances in Artificial Life.* Singapore: World Scientific.

Adamatzky, A., & Komosinski, M. (2009). *Artificial Life Models in Hardware.* London: Springer-Verlag.

Adamatzky, A., & Komosinski, M. (Eds.). (2005). *Artificial Life Models in Software.* Londres: Springer-Verlag.

Adami, C. (1998). *Introduction to Artificial Life.* New York: Springer Verlag.

Adami, C., Belew, R., Kitano, H., & Charles, T. (Eds.). (1998). *Artificial Life VI: Proceedings of the Sixth International Conference on Artificial Life.* Cambridge, MA: MIT Press.

Almeida, F., Mateus, L., Costa, E., Harvey, I., & Coutinho, A. (Eds.). (2007). *Advances in Artificial Life: 9th European Conference, ECAL 2007, Lisbon, Portugal, September, 2007. Proceedings.* Berlin: Springer-Verlag.

Artmann, S., & Dittrich, P. (Eds.). (2006). *Explorations in the Complexity of Possible Life: Abstracting and Synthesizing the Principles of Living Systems.* Berlin: AKA.

Ball, P. (1999). *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature*. Oxford: Oxford University Press

Banzhaf, W., & Eeckman, F. (Eds.). (1995). *Evolution and Biocomputation: Computational Models of Evolution.* Berlin: Springer-Verlag.

Banzhaf, W., Christaller, T., Dittrich, P., Kim, J., & Ziegler, J. (Eds.). (2003). *Advances in Artificial Life: 7th European Conference, ECAL 2003, Dortmund, Germany, September, 2003, Proceedings.* Berlin: Springer-Verlag.

Bedau, M. (2003a). Artificial Life. In L. Floridi (Ed.), *The Blackwell Guide to the Philosophy of Information and Computing* (pp. 197-211). Malden, MA: Blackwell Publishing.

Bedau, M. (2007). Artificial life. In M. Matthen, & C. Stephens (Eds.), *Handbook of the Philosophy of Biology Vol. 3* (pp. 585-603). Amsterdam: Elsevier.

Bedau, M. (2003b). Artificial Life: Organization, Adaptation and Complexity from the Bottom-Up. *Trends in Cognitive Sciences , 7* (11), 505-512.

Bedau, M. (1992). Philosophical Aspects of Artificial Life. In F. Varela, & P. Bourgine (Eds.), *Towards A Practice of Autonomous Systems* (pp. 494-503). Cambridge, MA: MIT Press.

Bedau, M. (1998). Philosophical Content and Method of Artificial Life. In T. Bynum, & J. Moor (Eds.), *The Digital Phoenix: How Computers are Changing Philosophy* (pp. 135-152). Oxford: Blackwell.

Bedau, M., McCaskill, J., Packard, N., & Rasmussen, S. (Eds.). (2000). *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life.* Cambridge, MA: MIT Press.

Bedau, M., McCaskill, J., Packard, N., Rasmussen, S., Adami, C., Green, D., et al. (2000). Open Problems in Artificial Life. *Artificial Life , 6* (4), 363-376.

Berthold, M., Glen, R., Diederichs, K., Kohlbahcer, O. & Fischer, I., (Eds.), (2005). *Computational Life Sciences I: First International Symposium, CompLife 2005, Konstanz, Germany, September 2005, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

Berthold, M., Glen, R. & Fischer, I., (Eds.), (2006). *Computational Life Sciences II: Second International Symposium, CompLife 2006, Cambridge, UK, September 27-29, 2006, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

Boden, M. (Ed.). (1996). *The Philosophy of Artificial Life.* Oxford: Oxford University Press.

Bonabeau, E., & Theraulaz, G. (1995). Why Do We Need Artificial Life? In C. Langton (Ed.), *Artificial Life: An Overview* (pp. 303-325). Cambridge: MIT Press.

Brooks, R., & Maes, P. (Eds.). (1994). *Artificial Life IV: Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems.* Cambridge, MA: MIT Press.

Bullock, S., Noble, J., Watson, R., & Bedau, M. (Eds.). (2008). *Artificial Life XI: Proceedings of the Eleventh International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems.* Cambridge, MA: MIT Press.

Capcarrere, M., Freitas, A., Bentley, P., Johnson, C., & Timmis, J. (Eds.). (2005). *Advances in Artificial Life: 8th European Conference, ECAL 2005, Canterbury, UK, September, 2005. Proceedings.* Berlin: Springer-Verlag.

Darley, V. (1994). Emergent Phenomena and Complexity. In R. Brooks, & P. Maes (Eds.), *Artificial Life IV: Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems* (pp. 411-416). Cambridge, MA: MIT Press.

Dave, C., Husbands, P., Meyer, J. A. & Wilson, S., (1994). *From Animals to Animats 3: Proceedings of the Third International Conference On Simulation of Adaptive Behavior*. Complex Adaptive Systems. Cambridge: MIT Press

Deutsch, A. & Dormann, S., (2005). *Cellular Automaton Modeling of Biological Pattern Formation: Characterization, Applications, and Analysis*. Boston: Birkhaüser

Emmeche, C. (1994). Is Life as a Multiverse Phenomenon? In C. Langton (Ed.), *Artificial Life III, SFI Studies in the Science of Complexity, Vol XVII* (pp. 553-568). Reading, MA: Addison-Wesley.

Emmeche, C. (1998). *Vida Simulada en el Ordenador: la Ciencia Naciente de la Vida Artificial.* Barcelona: Gedisa.

Fernández, J., & Moreno, A. (1992). *Vida Artificial.* Madrid: Eudema.

G. Flake, (1999). *The Computational Beauty of Nature*. Cambridge, MA: MIT Press

Floreano, D., Nicoud, J.-D., & Mondada, F. (Eds.). (1999). *Advances in Artificial Life: 5th European Conference, ECAL'99, Lausanne, Switzerland, September, 1999, Proceedings.* Berlin: Springer-Verlag.

Forbes, N., (2004). *Imitation of Life: How Biology is Inspiring Computing*. Cambridge, MA: MIT Press

Helmreich, S., (1998). *Silicion Second Nature. Culturing Artificial Life in a Digital World*. University of California Press

Heudin, J.-C. (2006). Artificial Life and the Sciences of Complexity: History and Future. In B. Feltz, M. Crommelinck, & P. Goujon (Eds.), *Self-Organization and Emergence in Life Sciences* (pp. 227-247). Holanda: Springer Verlag.

Heudin, J.-C. (Ed.). (1999). *Virtual Worlds: Synthetic universes, Digital Life, and Complexity.* Reading, MA: Perseus Books.

Holland, J. (1992). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introdyctory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. The MIT Press

Holland, J. (1998). *Emergence. From Chaos to Order*. Reading, MA: Addison-Wesley

Holland, J. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Reading, MA: Perseus Books

Husbands, P., & Harvey, I. (Eds.). (1997). *Fourth European Conference on Artificial Life.* Cambridge, MA: MIT Press.

Johnston, J. (2008). *The Allure of Machinic Life: Cybernetics, Artificial Life, and the New AI*. Cambridge, MA: MIT Press

Keeley, B. (1998). Artificial Life for Philosophers. *Philosophical Psychology , 11* (2), 251-260.

Kelemen, J., & Sosík, P. (Eds.). (2001). *Advances in Artificial Life: 6th European Conference, ECAL 2001 Prague, Czech Republic, September, 2001 Proceedings.* Berlin: Springer-Verlag.

Kember, S., (2003). *Cyberfeminism and Artificial Life*. London: Routledge

Kim, K.-J., & Cho, S.-B. (2006). A Comprehensive Overview of the Applications of Artificial Life. *Artificial Life , 12* (1), 153-182.

Korb, K., Randall, M., & Hendtlass, T. (Eds.). (2009). *Artificial Life: Borrowing from Biology. 4th Australian Conference, ACAL 2009, Melbourne, Australia, December 1-4, 2009, Proceedings.* Berlin: Springer-Verlag.

Kumar, S. & Bentley, P., (2003). *On Growth, Form and Computers*. London: Elsevier

Lahoz-Beltrà, R. (2004). *Bioinformática: Simulación, Vida Artificial e Inteligencia Artificial.* Madrid: Díaz de Santos.

Langton, C. (1989). Artificial Life. In C. Langton (Ed.), *Artificial Life, SFI Studies in the Science of Complexity, Vol VI* (pp. 1-47). Redwood City: Addison-Wesley.

Langton, C. (1996). Artificial Life. In M. Boden (Ed.), *The Philosophy of Artificial Life* (pp. 39-94). Oxford: Oxford University Press.

Langton, C. (Ed.). (1994). *Artificial Life III, SFI Studies in the Science of Complexity, Vol XVII.* Reading, MA: Addison-Wesley.

Langton, C. (Ed.). (1989). *Artificial Life, SFI Studies in the Science of Complexity, Vol VI.* Redwood City, USA: Addison-Wesley.

Langton, C. (Ed.). (1995). *Artificial Life: An Overview.* Cambridge: MIT Press.

Langton, C. (1991). Life at the Edge of Chaos. In C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II, SFI Studies in the Science of Complexity, Vol X* (pp. 41-91). Rewood City: Addison-Wesley.

Langton, C. (1984). "Self-Reproduction in Cellular Automata". *Physica 10D* , 135-144.

Langton, C. (1986). "Studying Artificial Life with Cellular Automata". *Physica 22D* , 120-149.

Langton, C., & Shimohara, K. (Eds.). (1997). *Artificial Life V: Proceedings of the Fifth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems.* Cambridge, MA: MIT Press.

Langton, C., Taylor, C., Farmer, D., & Rasmussen, S. (Eds.). (1991). *Artificial Life II, SFI Studies in the Science of Complexity, Vol X.* Redwood City: Addison-Wesley.

Lecky-Thompson, G. (2008). *AI and Artificial Life in Video Games.* Boston, MA: Course Technology.

Levy, S. (1992). *Artificial Life: A Report from the Frontier Where Computers Meet Biology.* New York: Vintage Books.

Li, K., Li, X., Irwin, G. W. & He, G. (Eds.). (2009). *Life System Modeling and Simulation International Conference, LSMS 2007, Shanghai, China, September 14-17, 2007. Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

McDermott, J., Samudrala, R., Bumgarner, R., Montgomery, K. & Ireton, R. (Eds.). (2009). *Computational Systems Biology*. New York: Humana Press

Meinhardt, H. (2009). *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*. Cuarta Edición. Berlin: Springer-Verlag

Morán, F., Moreno, A., Merelo, J. J., & Chacón, P. (Eds.). (1995). *Advances in Artificial Life, Third European Conference on Artificial Life, Granada, Spain, June, 1995, Proceedings.* Berlin: Springer-Verlag.

Moreno, A. (2000). Artificial Life as a Bridge Between Science and Philosophy. In M. Bedau, J. McCaskill, N. Packard, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life* (pp. 507-512). Cambridge, MA: MIT Press.

Noble, J., Bullock, S., & Di Paolo, E. (2000). Artificial Life: Discipline or Method? Report on a Debate Held at ECAL '99. *Artificial Life* , 145-148.

Packard, N., & Bedau, M. (2003). Artificial Life. In *Encyclopedia of Cognitive Science* (Vol. 1, pp. 209-215). Macmillan.

Prusinkiewicz, P. & Hanan, J., (1992). *Lindenmayer Systems, Fractals, and Plants*. Berlin: Sprnger-Verlag

Prusinkiewicz, P. & Lindenmayer, A., (1990). *The Algorithmic Beauty of Plants.* New York: Springer Verlag.

Randall, M., Abbass, H., & Wiles, J., (Eds.). (2007). *Progress in Artificial Life: Third Australian Conference, ACAL 2007, Proceedings.* Berlin: Springer-Verlag.

Ray, T. (1991). An Approach to the Synthesis of Life. In C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II, SFI Studies in the Science of Complexity, Vol X* (pp. 371-408). Redwood City: Addison-Wesley.

Ray, T. (1994). Jugué a ser Dios y Creé la Vida en mi Computadora. In C. Gutiérrez (Ed.), *Epistemología e Informática* (pp. 257-267). San José: UNED.

Recknagel, F. (Ed.). (2006). *Ecological Informatics: Scope, Techniques and Applications* (segunda ed.). Berlin: Springer-Verlag.

Resnick, M. (1994). *Turtles, Termites anf Traffic Jams*. Cambridge: MIT Press

Riskin, J. (Ed.). (2007). *Genesis Redux: Essays in the History and Philosophy of Artificial Life*. Chicago: University of Chicago Press

Rocha, L., Yaeger, L., Bedau, M., Floreano, D., Goldstone, R., & Vespignani, A. (Eds.). (2006). *Artificial Life X: Proceedings of the Tenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems.* Cambridge, MA: MIT Press.

Schaub, H., Detje, F., & Brüggemann, U. (Eds.). (2004). *The Logic of Artificial Life: Abstracting and Synthesizing the Principles of Living Systems. Proceedings of the Sixth German Workshop on Artificial Life.* Berlin: IOS Press.

Sipper, M. (1995). An Introduction to Artificial Life. *Explorations in Artificial Life (special issue of IA Expert)* , 4-8.

Sipper, M. (2006). Artificial Life: from Life-as-We-Know-It to Life-as-It-Could-Be. In J. Seckbach (Ed.), *Life as We Know It* (pp. 707-718). Dordrecht: Springer Verlag.

Standish, R., Bedau, M., & Abbass, H. (Eds.). (2003). *Artificial Life VIII: Proceedings of the Eighth International Conference on Artificial Life.* Cambridge, MA: MIT Press.

Taylor, C. (1991). Fleshing Out Artificial Life II. In C. Langton, C. Taylor, D. Farmer, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life II, SFI Studies in the Science of Complexity, Vol X* (pp. 25-38). Redwood City: Addison-Wesley.

Tu, X., (1999). *Artificial Animals for Computer Animation: Biomechanics, Locomotion, Perception, and Behavior*. Berlin: Springer-Verlag

Turing, A. (1952). The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences , 237* (641), 37-72.

Varela, F., & Bourgine, P. (Eds.). (1992). *Towards A Practice of Autonomous Systems.* Cambridge, MA: MIT Press.

Von Neumann, J. (1961-1963). *Collected Works, John Von Neumann, vol. 5: Design of Computers, Theory of Automata and Numerical Analysis.* (A. H. Taub, Ed.) New York: Pergamon Press.

Von Neumann, J. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata.* (A. Burks, Ed.) Urbana Ill.: University of Illinois Press.

Watson, J., Abbass, H., Lokan, C., & Lindsay, P. (2005). Software Engineering for Artificial Life, Complex Systems, and Agent-Based Distillation. *Complexity , 12*, 1-13.

Whitelaw, M., (2004). *Metacreation, Art and Artificial Life*. Cambridge, MA: MIT Press

5. Complejidad y ciencias sociales

El concepto de ciencias sociales y humanas es, *à la lettre*, un concepto decimonónico. Surge gracias a A. Comte y de ahí en adelante se desarrolla: ya sea en términos de ciencias del espíritu (Dilthey), o como ciencias sociales y ciencias humanas. Ulteriormente ha habido incluso la discusión acerca de "ciencias sociales aplicadas" *contrario sensu* a lo que sería un grupo de ciencias no aplicadas o puras. Dado el progreso del conocimiento el trabajo en términos interdisciplinarios, cruzados, transversales, integrales, que es justamente lo que caracteriza a la ciencia de punta en general y a las ciencias de la complejidad en particular, el concepto mismo de ciencias naturales o positivas y ciencias sociales y humanas resulta, al cabo, vetusto. Lo que sucede es que administrativamente, en el mundo entero aún se estructura el conocimiento en términos de las divisiones provenientes del siglo XIX y comienzos del siglo XX.

Como quiera que sea, las ciencias sociales y humanas requieren abrirse – de acuerdo con el informe de la Comisión Gulbenkian. Esta apertura de las ciencias sociales es, para un buen lector, de un lado, hacia la sociedad, y de otra parte y de un modo muy fundamental, abrirse a las ciencias llamadas naturales y a las tecnologías (ingenierías, digamos). Pues bien, con seguridad: se trata de abrirse a los progresos cruzados que en otros dominios científicos están teniendo lugar.

La bibliografía referida a continuación tiene que ver con el diálogo abierto, frontal, con las ciencias de la complejidad. Esta historia es reciente, pero es al mismo tiempo sólida y creciente. Está bien nutrida aunque aún se encuentre en pañales, por así decirlo[46].

5.1. Bibliografía general sobre complejidad y ciencias sociales y humanas

La idea general es que las ciencias sociales y humanas poseen, estudian, se ocupan de los sistemas, fenómenos y comportamientos de máxima complejidad conocida hasta la fecha, a saber: los sistemas humanos. Los fenómenos que ocupan los sistemas físicos, por ejemplo, son bastante más predecibles. Una parte de la comunidad científica de científicos sociales, cuando escuchan los temas de complejidad sostienen: "Pero si es justamente lo que

[46] En campos como la geografía y el trabajo social no existe (o no se ha logrado identificar) literatura al respecto.

hacemos nosotros, y es lo que siempre hemos dicho", o: "se trata de vino viejo en tonel nuevo", por ejemplo. Mientras que existe algún escepticismo en una parte de la comunidad de este grupo de científicos, incluidos filósofos, existe una parte grande y sólida que trabaja en términos de conceptos, metodologías, lenguajes y enfoques propios de las ciencias de la complejidad. Digámoslo de manera puntual: en el contexto de las ciencias de la complejidad, las antiguas divisiones entre ciencia y tecnología (ingeniería, por ejemplo), entre ciencias duras y ciencias blandas, entre ciencia y filosofía se hace, ya, insostenible. El encuentro de ciencias y disciplinas modifica el propio estatuto epistemológico y social que poseían antes del encuentro, el diálogo y el trabajo mancomunado.

El encuentro de ciencias y disciplinas se establece en función de la identificación de, y el trabajo sobre, *problemas*. Son los problemas los que unen a los científicos entre sí, y a ellos con la sociedad en general. Su comprensión, su esfuerzo de resolución, los horizontes que contienen, las dimensiones que anticipan – hacia delante y hacia atrás.

***

Epstein, J. & Axtell, R., (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Washington: Brookings

Gilbert, N. & Conte, R., (Eds.), (1995). *Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life*. London: UCL Press

Maldonado, C.E. (2008) "Complejidad y ciencias sociales desde el aporte de las matemáticas cualitativas". *Cinta de Moebio. Revista de Epistemología de ciencias sociales* 33 (Diciembre), 153-170

Prigogine, I., y Stengers, I., (1994). *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza

Taylor, M. C., (2003). *The Momento f Complexity. Emerging Network Culture*. The University of Chicago Press

Tyrtania, L., (1999). *Termodinámica de la supervivencia para las ciencias sociales*. Iztapala, México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana

Wallerstein, I., (2004). *The Incertainties of Knowledge*. Temple University (Hay traducción al español, en editorial Gedisa)

5.2. Complejidad y sociología

La sociología siempre se ocupó de sujetos colectivos –en el mejor espíritu de la complejidad-. Pero los redujo a diversos planos y conceptos. En este sentido, el primer libro sobre sociología y complejidad aparece en el 2006. Aunque, desde otra perspectiva, el libro de D. Watts –sociólogo de formación- es un ejemplo magnífico en el que la sociología se cruza con y se integra a la física, la criticalidad auto-organizada, las redes complejas, la

irreversibilidad de la flecha del tiempo, etc. Aquí, la sociología deja de ser tal –sencillamente ciencia social en el sentido de la clasificación propia del siglo XIX-, para metamorfosearse (I. Prigogine) en (uno de los componentes de las ciencias de la) complejidad.

***

Castellani, B. & Hafferty, F. W., (2008). *Sociology and Complexity Science: A New Field of Inquiry*. Berlin: Springer-Verlag

Smith, J., Jenks, C., (2006). *Qualitative Complexity.* London: Routledge

Sawyer, R. K., (2004). "The Mechanisms of Emergence", in: *Philosophy of the Social Sciences*, Vol. 34, No. 2, June, 260-282

Stewart, P., (2001). "Complexity Theories, Social Theory, and the Question of Social Complexity ", in: *Philosophy of the Social Sciences*, Vol. 31, No. 3, 323-360

Watts, D. J., (2003). *Six Degrees. The Science of a Connected Age*. New York: W. W. Norton & Co.

5.3. Complejidad y antropología

El primer libro de antropología y complejidad se concentra, sintomáticamente, en la vida artificial y en la cultura digital de la cual las ciencias de la complejidad es la mejor expresión. Es el estudio (tesis doctoral, en rigor) de Helmreich. Sin embargo, el libro de mayor profundidad en antropología y, por consiguiente en arqueología (la arqueología es antropología en pasado), es el trabajo, hasta ahora insuperable de Beekman y Baden. Por su parte, el trabajo de Adams tiene el mérito de trabajar las dinámicas sociales y culturales tomando como hilo conductor la energía. El libro de Pérez-Taylor es una compilación de textos que se mueven o intentan moverse hacia la complejidad, no siempre ni exactamente en la dirección de las ciencias de la complejidad.

***

Adams, R. N., (2001). *El octavo día. La evolución social como autoorganización de la energía*. Iztapala, México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana

Beekman, C. S., and Baden, W. W., (2005). *Non Linear Models for Archeology and Anthropology: Continuing the Revolution*, Ashgate Publishing, 2005

Helmreich, S., (1998). *Silicion Second Nature. Culturing Artificial Life in a Digital World*. University of California Press

Pérez-Taylor, R., (Comp.), (2002). *Antropología y complejidad.* Barcelona: Gedisa

Reynoso, C. (2006). *Complejidad y Caos: Una Exploración Antropológica.* Buenos Aires: SB.

5.4. Complejidad y filosofía

La corriente principal (*mainstream*) de la filosofía se ha dividido en dos: una que hace, al mejor ejemplo de autores como Aristóteles, Hegel o Husserl, de sí misma un motivo de trabajo; o, en el mejor de los casos, un pretexto para desarrollarse como *philosophia primera*. La otra, es la filosofía que renuncia a la metafísica y se transforma en ética, ética aplicada, sociología, teoría del derecho o filosofía política, entre otras. Los autores contemporáneos son numerosos en cualquier de estas dos posturas principales de la filosofía contemporánea. Entre los filósofos contemporáneos que trabajan complejidad resaltan los dos nombres mencionados a continuación. Un elemento común a ambos es que se trata, en rigor, de filósofos de la ciencia. Un nombre tangencial a las ciencias de la complejidad pero muy consciente del significado de temas como la vida artificial es D. Dennett, que se omite aquí debido a no tiene ningún texto mayor directamente relacionado con complejidad, aunque tiene varios artículos y capítulos de libro en eventos dedicados a la vida artificial y las ciencias cognitivas.

***

Bunge, M., (2003). *Emergence and Convergence: Qualitative Novelty and the Unity of Knowledge*. Toronto: University of Toronto Press

Rescher, N., (1998). *Complexity. A Philosophical Overview*. New Brunswick (U.S.A.) and London (U.K.): Transaction Publishers

5.5. Complejidad e historia

Consagrado como uno de los mejores historiadores contemporáneos, y entre los mejores en esta disciplina en toda la historia, W. H. McNeill tiene el mérito de abrir las puertas en doble vía: de la historia hacia la complejidad, y de la complejidad de la historia y la historiografía mismas. Sin embargo, sería injusto omitir aquí los trabajos de F. Fernández-Armesto, a pesar de que no emplea para nada el concepto de "complejidad" en su obra; sus trabajos son estupendos ejemplos de lo que es el trabajo historiográfico en el marco de las ciencias de la complejidad. De alguna manera también hay que mencionar aquí el trabajo historiográfico del teórico de la cultura, J. Barzun.

***

Gaddis, J. L., (2002). *The Landscape of History. How historians map the past*. New York: Oxford University Press

Lindenfeld, D. F., (1999). “Causality, Chaos Theory, and the End of the Weimar Republic: A Commentary on Henry Turner´s *Hitler´s Thirty Days to Power*”, in: *History and Theory*, 38 (October), 281-299

Maldonado, C. E. (2008) “History and Complexity”. *Filosofski Alternativi*, 5-17. (original en inglés, publicado en búlgaro)

McCloskey, D. N., (1991). “History, Differential Equations, and the Problem of Narration”, in: *History and Theory* 30 (February), 21-36

McNeill, W. H., (2001). “Passing Strange: The Convergence of Evolutionary Science with Scientific History”, in: *History and Theory* 40 (February), 1-15

McNeill, W. H., (1998). “History and the Scientific Worldview”, In: *History and Theory* 37 (February), 1-13

Reddy, W. M., (2001). “The Logic of Action: Indeterminacy, Emotion, and Historical Narrative”, in: *History and Theory* 40 (December), 10-33

Shermer, M., (1995). “Exorcising Laplace´s Demon: Chaos and Antichaos, History and Metahistory”, in: *History and Theory* 34 (February), 59-83

Wallerstein, I., (1987). “Historical systems as complex systems”, in: *European Journal of Operational Research*, 30: 203-207

5.6. Complejidad, administración y organizaciones sociales

Aunque la literatura sobre complejidad y administración es muy grande, son pocos los textos que valen la pena. La mayoría de la literatura es simple y llana jerga. Los textos que se mencionan a continuación dan una idea clara de que es posible pensar y actuar en contextos de finanzas, gobierno, administración, economía, teoría de juegos.

Los administradores, financistas e ingenieros son eminentemente pragmáticos y principalmente piensan en herramientas y aplicaciones. Una lectura juiciosa de la siguiente bibliografía sorprendería a más de administrador e ingeniero.

***

Axelrod, R., and M. D. Cohen, (1999). *Harnessing Complexity. Organizational Implications of a Scientifc Frontier*. New York: The Free Press

Baets, W., (2006). Complexity, Learning and Organizations: A Quantum Interpretation of Business. New York: Routledge

Byrne, D., (1998). *Complexity Theory and the Social Sciences: an Introduction*. London: Routledge

Clippinger, J. (1999). *The Biology of Business: Decoding the Natural Laws of Enterprise*. John Wiley & Sons

Cook, M., Noyes, J. & Masakowsky, Y. (Eds.). (2007). *Decision Making in Complex Environments*. Burlington: Ashgate.

Gilpin, D. R., Murphy, P. J., (2008). *Crisis Management in a Complex World*. Oxford: Oxford University Press

Grint, K., (2006). *Fuzzy Management. Contemporary Ideas and Practices at Work*. Oxford: Oxford University Press

Hanseth, O. & Ciborra, C., (Ed.). *Risk, Complexity and ICT*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing

Haynes, P., (2003). *Managing Complexity in the Public Services*. Berkshire: Open University Press

Helbing, D. (Ed.). (2008). *Managing Complexity: Insights, Concepts, Applications*. Berlin: Springer-Verlag.

Kraus, S. (2001). *Strategic Negotiation in Multiagent Environments*. Cambridge, MA: MIT Press.

McMillan, E. (2008). *Complexity, Management and the Dynamics of Change: Challenges for Practice*. Londres: Routledge.

McMillan, E. (2004). *Complexity, Organizations and Change.* Londres: Routledge.

Michalewicz, Z., Schmidt, M., Michalewicz, M. & Chiriac, C. (2007). *Adaptive Business Intelligence*. Berlin: Springer-Verlag.

Mitleton-Kelly, E., (Ed.), (2003). *Complex Systems and Evolutionary Perspective on Organisations: The Application of Complexity Theory to Organisations*. Oxford: Pergamon

North, M. & Macal, C. (2007). *Managing Business Complexity: Discovering Strategic Solutions with Agent-Based Modeling and Simulation*. Oxford: Oxford University Press.

Pascale, R., Millemann, M. & Gioja, L. (2000). *Surfing the Edge of Chaos: The Laws of Nature and the New Laws of Business*. Three Rivers Press.

Schredelseker, K., & Hauser, F. (2008). *Complexity and Artificial Markets*. Berlin: Springer-Verlag.

Stacey, R., Griffin, D. & Shaw, P. (2000). *Complexity and Management: Fad or Radical Challenge to Systems Thinking?* Londres: Routledge.

Qudrat-Ullah, H., Spector, J. & Davidsen, P. (Eds.). (2008). *Complex Decision Making: Theory and Practice*. Berlin: Springer-Verlag.

Voges, K. & Pope, N., (2006). *Bussiness Applications and Computational Intelligence*. Hershey: Idea Group Publishing

5.6.1. Complejidad, economía y finanzas

La economía tradicional permanece en el marco de cuatro ejes: microeconomía, macroeconomía, finanzas y comercio. Las demás son áreas episódicas, como la historia de las doctrinas económicas, por ejemplo. Las finanzas, por su parte pueden encontrar en el diálogo con los fractales luces novedosas.

***

Anderson, P. W., Arrow, K. J., Pines, D., (Eds.). (1988). *The Economy as an Evolving Complex System*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Vol. V. Westview Press

Arthur, W. B. (1994). *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*. Ann Arbor: University of Michigan Press

Arthur, W. B., Durlauf, S. N., Lane, D. A., (Eds.), (1997). *The Economy as an Evolving Complex System II*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Vol. XXVII. Westview Press

Blume, L. E., Durlauf, S. N., (2006). *The Economy as an Evolving Complex System III. Current Perspectives and Future Directions*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Oxford: Oxford University Press

Brabazon, A. & O'Neill, M. (Eds.). (2009). Natural Computing in Computational Finance Vol. 2. Berlin: Springer-Verlag

Ehrentreich, N. (2008). *Agent-Based Modeling: The Santa Fe Institute Artificial Stock Market Model Revisited*. Berlin: Springer-Verlag

Faggini, M. & Lux, T., (Eds.), (2009). *Coping with the Complexity of Economics*. Milan: Springer-Verlag

Finch, J. & Orillard, M., (Eds.), (2005).Complexity and the Economy: Implications for Economic Policy. Cheltenham: Edward Elgar Publishing

Garnsey, E. & McGlade, J., (Eds.), (2006). *Complexity and Co-Evolution: Continuity and Change in Socio-Economic Systems*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing

Maldonado, C. E. (2006). "Teoría de las catástrofes y teoría financiera". *Odeón. Observatorio De Economía y Operaciones Numéricas*, Universidad Externado de Colombia, 47-74

Mandelbrot, B. & Hudson, R. (2006). *Fractales y Finanzas: Una Aproximación Matemática a los Mercados: Arriesgar, Perder y Ganar*. Metatemas 93. Barcelona: Tusquets

Ormerod, P., (2005). *Why Most Things Fail. Evolution, Extinction & Economics*. New York: Pantheon Books

Rothschild, M. (1992). *Bionomics: Economy as an Ecosystem*. New York: Henry Holt & Co

Salzano, M. & Colander, D., (2007). *Complexity Hints for Economic Policy*. Milan: Springer-Verlag

5.6.2. Consultoría empresarial en el marco de las ciencias de la complejidad

Es sabido que en Estado Unidos hay un dicho muy popular: si una idea es buena, produce dinero. Pues bien, la complejidad –más exactamente las ciencias de la complejidad- son una muy, muy buena idea. En efecto, el número y la importancia de las empresas, las experiencias de negocios, que incorporan a las ciencias de la complejidad incluye a las más destacas y fuertes empresas en el mundo.

Siempre cabe recordar –no solamente en el plano teórico, político o militar, por ejemplo- aquella idea de H. Pagels según la cual quien domine las ciencias de la complejidad tendrá, por decir lo menos, una clara ventaja competitiva en el mercado, una posición de ventaja en los procesos de negociación en general, en fin, una estructura mental que le aporta réditos magníficos. Las referencias a continuación ilustran estas ideas. Aquí, la idea es que quienes estén interesados naveguen, en profundidad, en los links mencionados.

***

SolveIT Software. Fue fundada en ¿2005? en Adelaine, Australia por Zbigniew Michalewicz, Constantine Chiriac y Matthew Michalewicz, con el apoyo de la Universidad de Adelaine, Autralia y instituto Polish-Japanese IT.

ProtoLife, Inc. Se creó en 2004. Sus fundadores fueron Mark Bedau y Norman Packard. http://www.protolife.net

AntOptima. Se creó en 2001 en Lugano, Suiza. Su presidente es Enzo Lucibello. Dentro de sus más notables investigadores se encuentran Marco Dorigo y Luca Maria Gambardella. http://www.antoptima.com/

Icosystem. La fundó Eric Bonabeau en el año 2000 en Cambridge, MA, Estados Unidos. http://icosystem.com

NuTech Solutions. Fue fundada en 1999 por Dan Cullen, Matthew Michalewicz y Zibigniew Michalewicz. Tiene sedes en Estados Unidos, Alemania y Polonia. http://nutechsolutions.com

Eurobios. Se creó en 1999 en Paris, Francia. Su actual presidente es Hervé Zwirn. http://eurobios.com

Swarm Corp. Creada en 1997 en Nuevo México, Estados Unidos. Sus fundadores fueron Christopher Langton, Glen Ropella y Douglas Orr. http://tempusdictum.com/misc/swarmcorp-www/

Bios Group. Creada en 1996 en Nuevo México, Estados Unidos. Fue fundada por Stuart Kauffman y la compañía Ernst & Young. Hacia 2003, Bios Group fue comprada por NuTech Solutions.

Natural Selection, Inc. Creada en 1993 en San Diego, Estados Unidos. Fundada por Lawrence Fogel, David Fogel y Eva Fogel. http://www.natural-selection.com

Prediction Company. Creada en 1991 en Nuevo México, Estados Unidos. Fundada por Doyne Farmer, Normar Packard y Jim McGill. http://www.prediction.com

5.7. Complejidad y psicología

En psicología predominan, en el mejor de los casos, ya con personalidad propia, los enfoques sistémicos. Hace rato que existe, con estatuto y derecho propio una sicología sistémica. Con mucha frecuencia, se hace referencia a la obra de H. Maturana. Sin embargo, hay que decir que, en sentido estricto, la obra de Maturana no forma parte, en manera alguna de las ciencias de la complejidad, sino de aquello que, en referencia a la Enciclopedia de Complejidad y Ciencias de Sistemas reseñada antes arriba, se integra en las ciencias de sistemas; que son históricamente anteriores a la emergencia de la complejidad. El segundo libro referido a continuación contiene el nacimiento (y el debate) del concepto de autopoiesis, obra de F. Varela y H. Maturana.

***

Maturana, H., Varela, F., (1990). *El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del conocimiento humano*. Madrid: Debate

Maturana, H., Varela, F., (1994). *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: La autoorganización de lo vivo*. Buenos Aires: Lumen

5.8. Complejidad y estudios culturales

Los estudios culturales están dominados, hoy por hoy, por los llamados estudios post-coloniales. En un sentido estricto, los estudios post-coloniales han logrado recientemente demarcarse del llamado pensamiento postmodernista. Pues bien, los dos libros mencionados a continuación se zambullen, si cabe la expresión, en el mar de las ciencias de la complejidad; con placer y con habilidad de buenos nadadores.

***

Taylor, M. C., (2001). *The Moment of Complexity. Emerging Network Culture*. Chicago: The University of Chicago Press

Wheeler, W., (2006). *The Whole Creature. Complexity, Biosemiotics and the Evolution of Culture*. London: Lawrence & Whishart

6. Ingeniería de sistemas complejos

La historia de la ingeniería se divide en dos: la ingeniería clásica o ingeniería convencional –la cual incluye a la ingeniería de sistemas reversos- y la ingeniería de sistemas complejos. Aquella tiene un paradigma fisicalista, digamos. Esta otra se inspira en la biología y la ecología. El primero de los libros sobre ingeniería de sistemas complejos aparece recién en el 2006. Desde entonces, no obstante, su desarrollo ha sido impresionante. Sin embargo, en el mundo, facultades de ingeniería y de administración permanecen aún al margen del estudio y trabajo en ingeniería de sistemas complejos. Tan sólo a nivel de Institutos y Centros de Investigación se incorpora, se desarrolla, se trabaja y se enseña activamente la ingeniería de sistemas complejos. Y por consiguiente, la computación bioinspirada.

* * *

Awrejcewicz, J. (Ed.). (2009). *Modeling, Simulation and Control of Nonlinear Engineering: State-of-the-Art, Perspectives and Applications*. Berlin: Springer-Verlag

Banzhaf, W., & Pillay, N. (2007). Why Complex Systems Engineering Needs Biological Development. *Complexity , 13* (2), 12-21.

Braha, D., Minai, A., & Bar-Yam, Y. (Eds.). (2006). *Complex Engineered Systems: Science Meets Technology.* Cambridge, MA: Springer-Verlag.

Cook, S., Kasser, J., & Ferris, T. (2003). Elements of a Framework for the Engineering of Complex Systems. *9th ANZSYS Conference.* Melbourne.

Farooq, M., (2009). *Bee-Inspired Protocol Engineering: From Nature to Networks*. Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag

Ioannou, P. & Pitsillides, A. (Eds.). (2008). *Modeling and Control of Complex Systems*. Boca Raton: CRC Press

Jamshidi, M. (Ed.). (2009). *Systems of Systems Engineering. Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press

Maldonado, C. E., (2010). Ingeniería de sistemas complejos. Retos y oportunidades, en: Pineda, L. y Padilla, P., (Eds.). *El Futuro de la Educación en Ingeniería y la Gestión de*

la Ingeniería. Una Perspectiva Sistémica. Metz: (Francia): Ed. Universidad del Rosario, Instituto Tecnológico de Metz

Norman, D., & Kuras, M. (2006). Engineering Complex Systems. In D. Braha, A. Minai, & Y. Bar-Yam (Eds.), *Complex Engineered Systems: Science Meets Technology* (pp. 206-245). Berlin: Springer-Verlag.

Oliver, D., Kelliher, T., & Keegan, J. (1997). *Engineering Complex Systems Wiht Models and Objects.* New York: McGraw-Hill.

Ronald, E., & Sipper, M. (2000). Engineering, Emergent Engineering, and Artificial Life: Unsurprise, Unsurprising Surprise, and Surprising Surprise. In M. Bedau, M. John, N. Packard, & S. Rasmussen (Eds.), *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life* (pp. 523-528). Cambridge, MA: MIT.

Wolfram, S. (1986). Approaches to Complexity Engineering. *Physica D , 22*, 385-399.

Villamil, J., & Gómez Cruz, N. (2009). *Ingeniería de Sistemas Complejos*, en: C. E. Maldonado, *Complejidad: revolución científica y teoría*, Bogotá, Ed. Universidad del Rosario, págs. 71-82

6.1. Metaheurísticas (híbridas, paralelas, hiperheurísticas), optimización y resolución de problemas

Digámoslo de manera franca: la ciencia contemporánea no es una posesión o una adquisición –en marcado contraste con la ciencia moderna, que responde en realidad al mismo espíritu de la Edad Media-. Por el contrario, hoy por hoy se es científico –en el sentido al mismo tiempo más amplio e incluyente que abarca, por ejemplo, al arte tanto como a la ingeniería, a la ciencia tanto como a la filosofía-, en función de los problemas que se tengan o que se propongan. En este sentido, se produce un giro de los problemas clásicos de optimización y la misma comprensión acerca de las preguntas, los problemas y las soluciones a los problemas, para volver la mirada hacia las metaheurísticas y los espacios (o conjuntos) de solución de los problemas.

Dicho en el lenguaje clásico: tradicionalmente se pensó que la filosofía consistía en formular preguntas o en concebir problemas; pero las respuestas –cuando las había- no eran tanto filosóficas, cuanto que científicas. La tarea de la ciencia fue siempre la de resolver enigmas, despejar dudas, revelar incógnitas. Pues bien, en el marco del espíritu y del trabajo en ciencias de la complejidad, la filosofía ha aprendido a apostarle a las respuestas, tanto como que la ciencia misma ha aprendido a formular preguntas y a concebir problemas.

Es una especificidad del trabajo en complejidad no pensar en una solución única, mejor, óptima, maximizadora, o ni siquiera de *second best*. Las ciencias de la complejidad piensan en conjuntos de problemas y, consiguientemente, en conjuntos de soluciones. A eso apunta

el lenguaje empleado tal como redes, cascadas, percolación, sensibilidad a las condiciones iniciales, y otros. El hecho fantástico estriba en el hecho de que las metaheurísticas jalonan todo el trabajo de respuesta y solución a los retos y problemas. Aquí, el computador constituye una herramienta imprescindible.

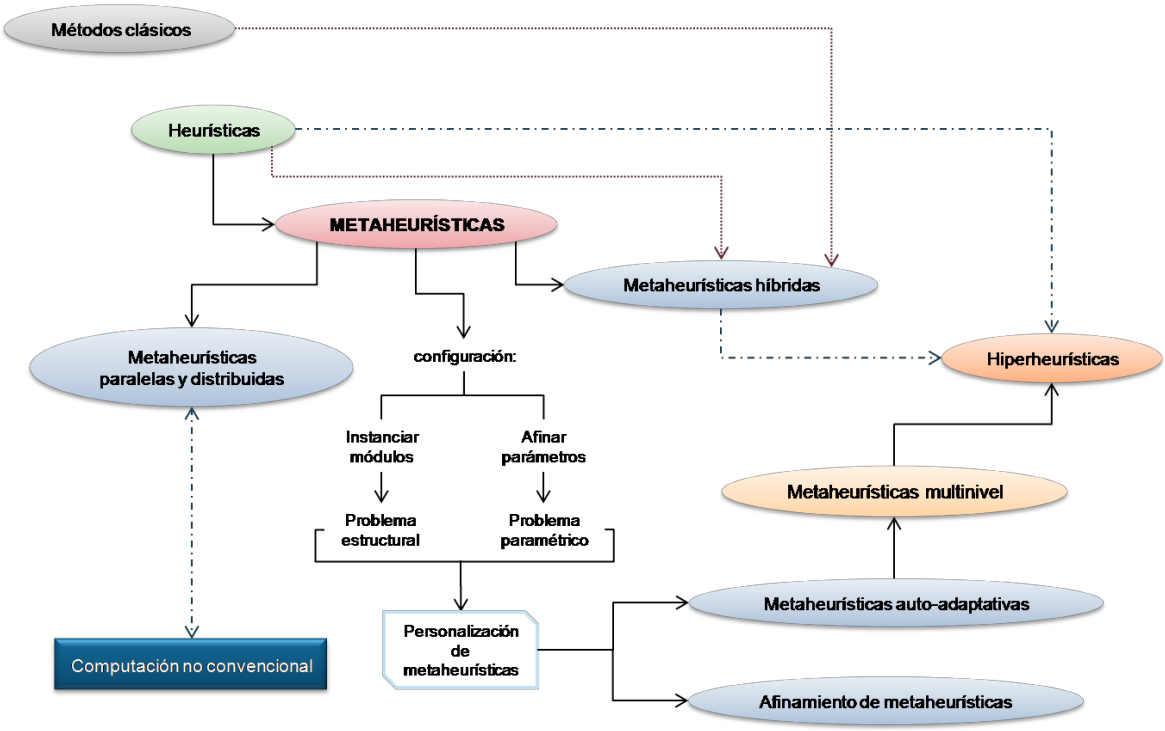
Pues bien, las metaheurísticas son el marco algorítmico más reciente para el trabajo con, y la resolución de, problemas complejos en ciencia, ingeniería y negocios. Estas reconocen la imposibilidad de una solución óptima y buscan hallar, por el contrario, soluciones "razonables" con recursos "aceptables". Antes de ellas predominaron las técnicas convencionales de la investigación de operaciones y los modelos heurísticos de la inteligencia artificial (esquema 12). Pero, justamente, el trabajo con metaheurísticas se hace necesario e incluso ineludible cuando las técnicas y los modelos convencionales reconocen su incapacidad para abordar los problemas de complejidad creciente.

Cuatro grandes retos (o problemas abiertos) motivan las investigaciones más recientes en el campo de las metaheurísticas (esquema 11):

- El primero tiene que ver con posibilidad, e incluso con la necesidad, de construir sistemas híbridos no sólo empleando metaheurísticas sino también, además, modelos matemáticos clásicos (de la investigación de operaciones) y heurísticas convencionales (de la inteligencia artificial). Algunos de los campos que más aportan a esta discusión son la computación suave (sección 6.2..1) y la inteligencia computacional (sección 6.2..2).
- El segundo reto consiste en saber cuándo y cuál metaheurística elegir durante el proceso de resolución de un problema determinado. El plano más desarrollado en esta dirección es el de las *hiperheurísticas*, que son técnicas que emplean (meta) heurísticas en un nivel superior para la elección de (meta) heurísticas en un nivel inferior. La finalidad es seleccionar en cada punto de decisión de un problema dado, y de forma automática, la (meta) heurística de bajo nivel más adecuada a partir de un conjunto finito de posibilidades.
- El tercer problema se refiere al diseño de metaheurísticas paralelas y distribuidas con el fin de explotar las cada vez mayores prestaciones que estas arquitecturas suponen. A su vez, este reto estimula el desarrollo de nuevas arquitecturas y modelos de computación. Allí, los trabajos en *computación no convencional* juegan un papel central.
- Finalmente, el cuarto reto intenta subsanar las dificultades manifiestas cuando de afinar o poner a punto los parámetros de la(s) metaheurística(s) seleccionada(s) (= configurar la(s) metaheurística(s)) se trata. Un ejemplo conspicuo en este caso son las *metaheurísticas auto-adaptativas*.

Las dos familias principales de metaheurísticas son: las metaheurísticas basadas en soluciones únicas y las metaheurísticas basadas en poblaciones. La primera familia se inspira principalmente en las matemáticas, la lógica y la física, y consiste en la manipulación y transformación de una solución única a lo largo del proceso de búsqueda y optimización. En este grupo se encuentran la búsqueda tabú, el temple simulado, la búsqueda local y la búsqueda local iterada, entre otras. El segundo grupo se inspira, fundamentalmente, en la biología y emplea no una solución única sino una

población de soluciones que interactúan y evolucionan en el tiempo. Es en este segundo caso cuando se habla de espacios de soluciones. En este grupo son cuatro los principales paradigmas: la computación evolutiva, la inteligencia de enjambres, la computación inmunológica y la computación con membranas.



Esquema 11. Estado del arte del trabajo con metaheurísticas. Esquema realizado por los autores.

Ambas familias son complementarias. Mientras las primeras son muy buenas para *explotar* las mejores soluciones en una zona específica (optimización local), el segundo grupo logra *explorar* todo el espacio de soluciones (optimización global). En otras palabras: mientras estas *intensifican*, aquellas *diversifican*. Los problemas (complejos) actuales en ciencia e ingeniería implican tanto explotación como exploración, justificando, una vez más, la necesidad y la pertinencia de los sistemas híbridos.

Finalmente, en el núcleo de la optimización de sistemas complejos el énfasis está del lado de la optimización global antes que local y, con ella, los problemas son los de la optimización bajo incertidumbre, la optimización dinámica, la optimización multiobjetivo y la optimización robusta.

***

Alba, E., (Ed.), (2005). *Parallel Metaheuristics: A New Class of Algorithms*. New Jersey: John Wiley & Sons

Alba, E., Blum, C., Isasi, P., León, C. & Gómez J. A., (2009). *Optimization Techniques for Solving Complex Problems*. New Jersey: John Wiley & Sons

Bianchi, L., Dorigo, M., Gambardella, L. M., & Gutjahr, W. (2008). A Survey on Metaheuristics for Stochastic Combinatorial Optimization. *Natural Computing* (8), 239–287.

Birattari, M. (2009). *Tuning Metaheuristics. A Machine Learnig Perspective*. Berlin: Springer-Verlag

Blum, C., Blesa, M. J., Blesa, A. & Sampels, M. (Eds.). (2008). *Hybrid Metaheuristics: An Emerging Approach to Optimization*. Berlin: Springer-Verlag

Coello, C., Dhaenens, C. & Jourdan, L. (Eds.). (2010). *Advances in Multi-Objective Nature Inspired Computing*. Berlin: Springer-Verlag

Cotta, C., Sevaux, M., Sörensen, K., (Eds.), (2008). *Adaptive and Multilevel Metaheuristics*. Berlin: Springer Verlag

Doerner, K. et al. (Eds.). (2007). *Metaheuristics: Progress in Complex Systems Optimization*. Berlin: Springer-Verlag

Donoso, Y. & Fabregat, R. (2007). *Multi-Objective Optimization in Computer Networks Using Metaheuristics*. Boca Raton: Auerbach Publications

Dreo, J., Pétrowski, A., Siarry, P. & Taillard, E. (2006). *Metaheuristics For Hard Optimization: Methods and Case Studies*. Berlin: Springer-Verlag

Glover, F. & Kochenberger, G., (Eds.), (2003). *Handbook of Metaheuristics*. New York: Klewer Academic Publishers

Ibaraki, T., Nonobe, K. & Yagiura, M., (Eds.), (2005). *Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers*. Berlin: Springer-Verlag

Knowles, J., Corne, D. & Deb, K., (Eds.), (2008). *Multiobjective Problem Solving from Nature: From Concepts to Applications*. Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag

Lewis A., Mostaghim, S., Randal, M. (Eds.), (2009). *Biologically-Inspired Optimisation Methods: Parallel, Systems and Applications*. Berlin: Springer

Maniezzo, V., Stützle, T. & VoB, S. (Eds.). (2009). *Matheuristics: Hybridizing Metaheuristics and Mathematical Programming*. Berlin: Springer-Verlag

Marti, K. (2008). *Stochastic Optimization Methods*. Segunda edición. Berlin: Springer-Verlag

Michalewicz, Z. & Fogel, D., (2000). *How to Solve It: Modern Heuristics*. Berlin: Springer-Verlag

Olariu, S. & Zomaya, A., (Eds.), (2006). *Handbook of Bioinspired Algorithms and Applications*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC

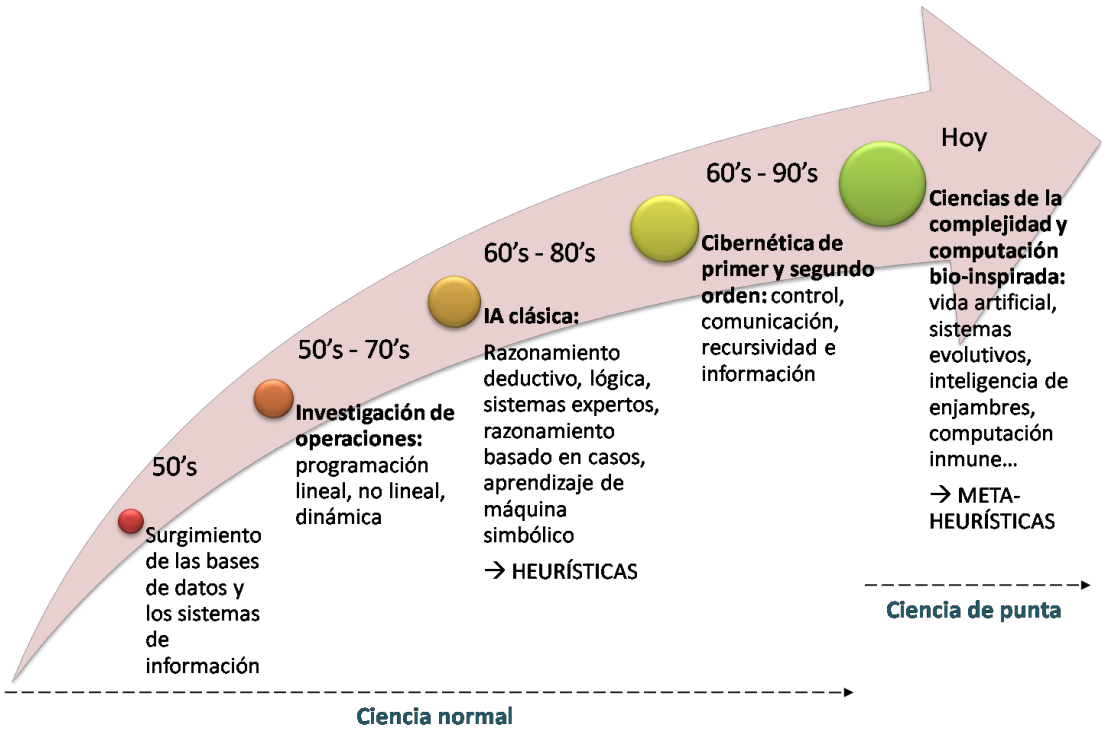
Passino, K., (2005). *Biomimicry for Optimization, Control, and Automation*. Berlin: Sprnger-Verlag

Siarry, P. & Michalewicz, Z., (Eds.), (2008). *Advances in Metaheuristics for Hard Optimization*. Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag

Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation.* New Jersey: John Wiley & Sons.

6.2. Sistemas computacionales naturales, inteligentes y biológicos

Computar es un rasgo común, transversal, si se prefiere, a los seres humanos, a los sistemas expertos y artificiales, a la vida en general y a la naturaleza misma. Cada época posee su propia metáfora ("El Gran Arquitecto", "La Máquina Perfecta", y muchos otros). Una de las últimas metáforas acuñadas es el reconocimiento de que, finalmente, esto es, sustancialmente, lo que hace el universo es computar; es decir, se trata de la idea según la cual *podemos encontrar procesos de cómputo en todas las escalas y fenómenos de la naturaleza*. En particular, como un subconjunto de los sistemas de computación natural, encontramos la computación inspirada biológicamente (o computación con metáforas biológicas).



Esquema 12. Técnicas de optimización y con estrategias computacionales. Esquema realizado por los autores.

El esquema 12 muestra la evolución de las técnicas de resolución de problemas (de optimización) y, con ellas, de los sistemas computacionales. De un lado, las técnicas de resolución de problemas pasaron de los modelos matemáticos a los modelos inspirados por la biología, atravesando por los sistemas inteligentes y los sistemas cibernéticos. No en vano, las miradas se han desplazado hacia la inteligencia artificial bio-inspirada, hacia la inteligencia computacional y hacia los sistemas complejos adaptativos inteligentes, y cada vez se habla menos de la inteligencia artificial (clásica) sin más. Los textos que se muestran en esta sección dan muestras consistentes de este hecho.

Los sistemas computacionales, por su parte, pasaron de arquitecturas seriadas a modelos masivamente paralelos, análogamente a como funcionan los sistemas vivos. En el plano de las metaheurísticas, el tránsito de dio de las metaheurísticas basadas en soluciones únicas (búsqueda tabú, el temple simulado o la búsqueda local iterada, por ejemplo) hacia las metaheurísticas bio-inspiradas basadas en poblaciones (computación evolutiva, computación con membranas, inteligencia de enjambres, entre otros). El esquema 12 sirve, además, como criterio de demarcación entre el pensamiento (= ciencias) sistémico (sistémicas), la cibernética, la inteligencia artificial y las ciencias de la complejidad (y de suyo los sistemas bio-inspirados).

***

Coppin, B. (2004). *Artificial Intelligence Illuminated.* Sudbury, MA: Jones and Bartlett.

Lungarella, M., Iida, F., Bongard, J. & Pfeifer, R. (Eds.). (2007). *50 Years of Artificial Intelligence: Essays Dedicated to the 50th Anniversary of Artificial Intelligence*. Berlin: Springer-Verlag

Porto, A., Pazos, A. & Buño, W., (Eds.), (2009). *Advancing Artificial Intelligence Through Biological Process Applications*. Hershey, PA: Information Science Reference

Schuster, A. (Ed.). (2007). *Intelligent Computing Everywhere*. Berlin: Springer-Verlag

Yang, A., & Shan, Y. (2008). *Intelligent Complex Adaptive Systems.* Hershey, PA: IGI Publishing.

6.2.1. Computación suave

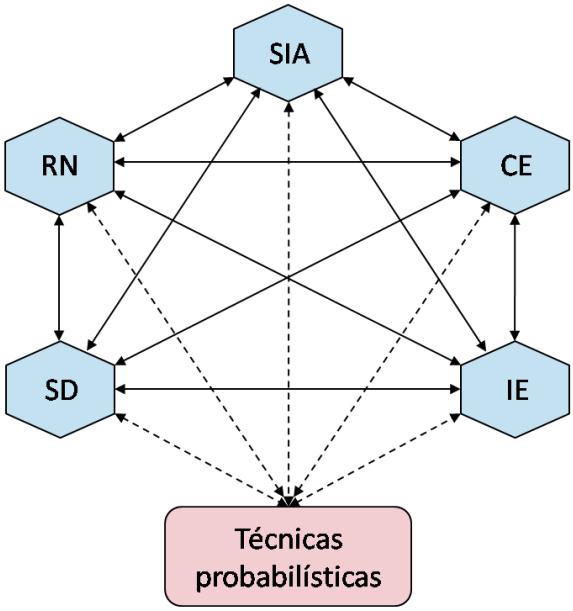
Avineri, E., Köppen, M., Dahal, K., Sunitiyoso, Y. & Roy, R. (Eds.). (2009). *Advances in Soft Computing: Updating the State of the Art*. Berlin: Springer-Verlag

Balas, V. E., Fodor, J. & Várkonyi-Kóczy, A., (Eds.), (2009). *Soft Computing Based Modeling in Intelligent Systems*. Berlin: Springer-Verlag

6.2.2. Inteligencia computacional

El esquema 14 hace referencia a los diferentes paradigmas de la *inteligencia computacional*. Son ellos (el orden no importa): los sistemas difusos, las redes neuronales, los sistemas inmunes artificiales, la computación evolutiva y la inteligencia de enjambres: todos ellos provenientes, en algún sentido, de metáforas biológicas. Se acentúa, además, el papel de las posibles relaciones entre ellas.

Los dos aspectos clave de este reconocimiento son dos. De un lado, la inteligencia artificial se ha desplazado, a través de la inteligencia computacional, al plano, ciertamente más interesante y fructífero, de los sistemas bio-inspirados. De otra parte, se pone de manifiesto la posibilidad y el potencial de pensar en sistemas híbridos como lo plantea el esquema 14.



Esquema 13. Paradigmas de la inteligencia computacional. SI: sistemas difusos, RN: redes neuronales, SIA: sistemas inmunes artificiales, CE: computación evolutiva, IE: inteligencia de enjambres. La flechas representan posibles interacciones para formar sistemas híbridos. Adaptado desde (Engelbrecht, 2007).

***

Abraham, A., Hassanien, A., Siarry, P. & Engelbrecht, A. (Eds.). (2009). *Foundations of Computational Intelligence Volume 3: Global Optimization*. Berlin: Springer-Verlag

Chen, Y. & Abraham, A., (2010). *Tree-Structure Based Hybrid Computational Intelligence: Theoretical Foundations and Applications*. Berlin: Springer-Verlag

Eberhart, R. & Shi, Y., (2007). *Computational Intelligence: Concepts to Implementations*. Burlington, MA: Morgan Kaufmann Publishers

Engelbrecht, A. (2007). *Computational Intelligence: An Introduction*. Segunda edición. Chichester: John Wiley & Sons.

Floreano, D., & Mattiussi, C. (2008). *Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, ans Technologies.* Cambridge, MA: MIT Press.

Fulcher, J., & Jain, L. (Eds.). (2008). *Computational Intelligence: A Compendium.* Berlin: Springer-Verlag

Halgamuge, S. & Wang, L., (Eds.), (2005). *Computational Intelligence for Modelling and Prediction*. Berlin: Springer-Verlag

Jain, L., Sato-Ilic, M., Virvou, M., Tsihrintzis, G., Balas, V. & Abeynayake, C., (Eds.), (2008). *Computational Intelligence Paradigms: Innovative Applications*. Berlin: Springer-Verlag

Kasabov, N. (2007). *Evolving Connectionist Systems: The Knowledge Engineering Approach*. Segundda Edición. Berlin: Springer-Verlag

Kordon, A., (2010). *Applying Computational Intelligence: How to Create Value*. Berlin: Springer-Verlag

Mumford, C. & Jain, L. (Eds.). (2009). *Computational Intelligence: Collaboration, Fusion ang Emergence*. Berlin: Springer-Verlag

Smolinski, T., Milanova, M. & Hassanien, A. E. (Eds.). (2008). *Applications of Computational Intelligence in Biology: Current Trends and Open Problems*. Berlin: Springer-Verlag

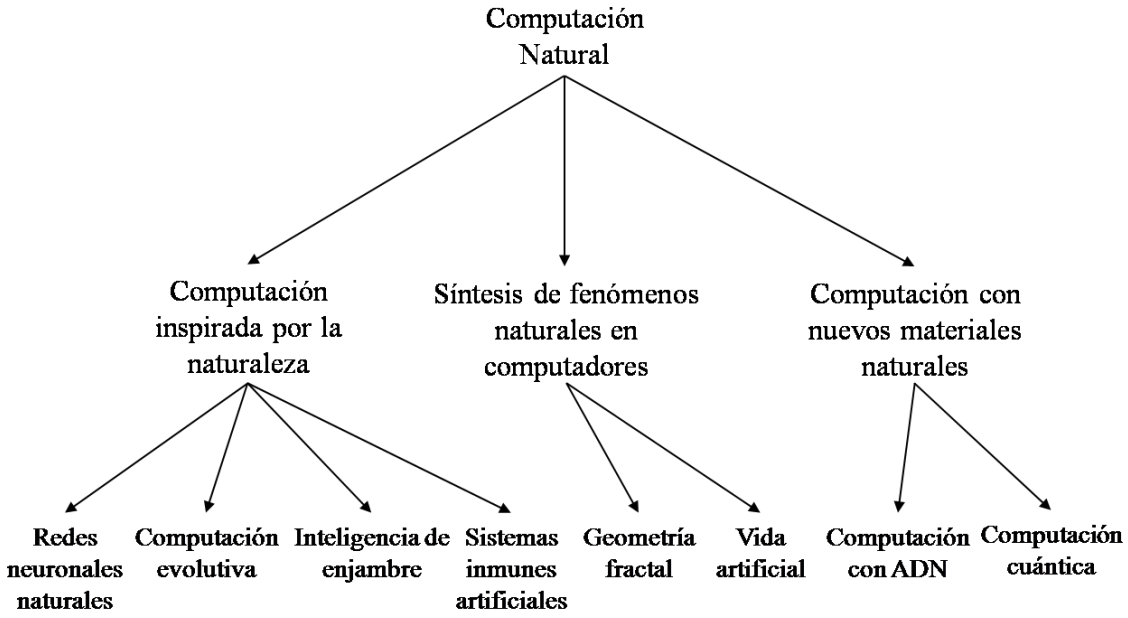
Voges, K. & Pope, N., (2006). *Bussiness Applications and Computational Intelligence*. Hershey: Idea Group Publishing

6.2.3. Computación natural

En otro plano distinto, aunque fuertemente relacionado con la computación suave y la inteligencia computacional, se encuentra el campo de la *computación natural*. Dicho campo tiene tres grandes ramas que lo componen, estas son: i) el uso de metáforas provenientes de la naturaleza (en particular de la biología) para resolver problemas, ii) el modelamiento, la simulación y la síntesis de fenómenos naturales a través del computador y iii) el uso de ideas y/o materiales naturales (como moléculas o células) para llevar a cabo procesos de computo inéditos cuando se los mira retrospectivamente. El esquema 15 permite observar la evolución –literalmente: las especiaciones- que la computación natural ha tenido. Este mismo esquema suministra una idea clara acerca de la evolución de la arquitectura de la computación –desde von Neumann- hasta los desarrollos más recientes y –verosimilmente- hacia el futuro.

Con este esquema, en realidad, aquello de lo cual se trata finalmente es el esfuerzo de abordaje de los problemas decidibles hacia los problemas indecidibles – un tema que se

menciona en varias ocasiones en este libro. Este fue un tema que el mismo A. Turing vislumbró y cuyo estudio se conoce hoy como *hipercomputación.*



Esquema 14. Ramas de la computación naturales según (de Castro, 2007).

***

Ballard, D., (1999). *An Introduction to Natural Computation*. Complex Adaptive Systems. Cambridge, MA: MIT Press

Beliczynski, B., Dzielinski, A., Iwanowski, M. & Ribeiro (Eds). (2007). *Adaptive and Natural Computing Algorithms, Part I*. Berlin: Springer-Verlag

Beliczynski, B., Dzielinski, A., Iwanowski, M. & Ribeiro (Eds). (2007). *Adaptive and Natural Computing Algorithms, Part II*. Berlin: Springer-Verlag

Brabazon, A. & O'Neill, M. (Eds.). (2009). *Natural Computing in Computational Finance Vol. 2*. Berlin: Springer-Verlag

Brauer, W., Ehrig, H., Karhumäki, J. & Salomaa, A., (Eds.). *Formal and Natural Computing: Essays Dedicated to Grzegorz Rozenberg*. Berlin: Springer-Verlag

Condon, A., Harel, D., Kok, J. Salomaa, A. & Winfree, E., (Eds.), (2009). *Algorithmic Bioprocesses*. Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag

De Castro, L. N. (2007). "Fundamentals of Natural Computing: An Overview". *Physics of Life* (4), 1-36.

De Castro, L. N., & Von Zuben, F. (2005). *Recent Developments in Biologically Inspired Computing.* Hershey, PA: Idea Group Publishing.

Flake, G., (1998). *The Computational Beauty of Nature : Computer Explorations of Fractals, Chaos, Complex Systems, and Adaptation*. Cambridge: MIT Press

Hirvensalo, M., (2004). *Quantum Computing*. Natural Computing Series. Segunda edición. Berlin: Springer-Verlag

Ribeiro, B., Albrecht, R., Dobnikar, A., Pearson, D. & Steele, N., (Eds.), (2005). *Adaptive and Natural Computing Algorithms: Proceedings of the International Conference in Coimbra, Portugal, 2005*. Wien: Springer-Verlag

Suzuki, Y., Hagiya, M., Umeo, H. & Adamatzky, A. (Eds.). (2009). *Natural Computing: 2nd International Workshop on Natural Computing, Nagoya, Japan, December 2007. Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

Zomaya, A. (Ed.). (2006). *Handbook of Nature-Inspired and Innovative Computing: Integrating Classical Models with Emerging Technologies*. Berlin: Springer-Verlag.

6.3. Computación evolutiva o algoritmos evolutivos

La simbiosis entre teoría de la evolución –y con ella, por debajo de ella, por así decirlo, la referencia a la Nueva Biología- y la computación en general constituye, sin ninguna duda, una de las realizaciones más originales en las ciencias de la complejidad. Al respecto, sigue siendo totalmente válido el reconocimiento –muy temprano- que hizo H. Pagels acerca de la importancia de las relaciones entre complejidad y computación. Al mismo tiempo que el computador hace posible a las ciencias de la complejidad, éstas contribuyen de manera significativa al propio desarrollo de la computación.

Podemos hablar, como es efectivamente, el caso, de tres clases de ciencia: la ciencia de tipo inductivo (o empírico o empirista), la ciencia de tipo deductivo (o racionalista), y la ciencia con base en modelamiento y simulación. Los dos primeros tipos de ciencia corresponden a la ciencia clásica y, por derivación, a toda la ciencia habida en la historia de la humanidad Occidental. La tercera es perfectamente novedosa y dirige la mirada, absolutamente, hacia el futuro.

***

Alba, E. & Dorronsoro, B., (2008). *Cellular Genetic Algorithms*. Berlin: Springer-Verlag

Ashlock, D., (2006). *Evolutionary Computation for Modeling and Optimization*. Berlin: Springer-Verlag

Bäck, T., Fogel, D. and Michalewicz, Z., (Eds.), (2000). *Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators*. Bristol: Institute of Physics Publishing

Bäck, T., Fogel, D. and Michalewicz, Z., (Eds.), (2000). *Evolutionary computation 2: Advanced Algorithms and Operators*. Bristol: Institute of Physics Publishing.

Bandyopadhyay, S. & Pal, S., (2007). *Classification and Learning Using Genetic Algorithms: Applications in Bioinformatics and Web Intelligence*. Natural Computing Series. Berlin: Springer Verlag

Banzhaf, W., Nordin, P., Keller, R. & Francone, F., (1998). *Genetic Programming: An Introduction. On the Automatic Evolution of Computer Programs and Its Applications*. San Francisco: Morgan Kaufmann

Bartz-Beielstein, T. (2006). *Experimental Research in Evolutionary Computation: The New Experimentalism.* Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag.

Brameier, M. & Banzhaf, W. (2007). *Linear Genetic Programming*. Berlin: Springer-Verlag

Chen-Tan, K., Hiot-Lim, M., Yao, X. & Wang, L., (Eds.), (2004). *Recent Advances in Simulated Evolution and Learning*. Advances in Natural Computation Vol. 2. Singapore: World Scientific

Davis, L. (Ed.). (1987). *Genetic Algorithms and Simulated Annealing: An Overview*. Los Altos, CA: Morgan Kaufmann Publishers, Inc.

De Jong, K. A. (2006). *Evolutionary Computation: A Unified Approach.* Cambridge, MA: MIT Press.

Dumitrescu, D., Lazzerini, B., Jain, L., & Dumitrescu, A. (2000). *Evolutionary Computation.* Boca Raton: CRC Press.

Feoktistov, V., (2006). *Differential Evolution in Search of Solutions*. Berlin: Springer-Verlag

Fogel, D, Baeck, T. & Michalewicz, Z., (Eds.), (1997). *The Handbook of Evolutionary Computation*. Oxford: IOP Publishing & Oxford University Press

Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Reading, MA: Addison-Wesley

Hingston, P., Barone, L. & Michalewicz, Z., (Eds.), (2008). *Design by Evolution: Advances in Evolutionary Design*. Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag

Koza, J., (1990). *Genetic Programming: A Paradigm for Genetically Breeding Populations of Computer Programs to Solve Problems*. Stanford: Stanford University

Koza, J., (1998). *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, MA: MIT Press

Kramer, O. (2008). *Self-Adaptive Heuristics for Evolutionary Computation.* Berlin: Springer-Verlag.

Lobo, F., Lima, C. & Michalewicz, Z. (Eds.). (2007). *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms*. Berlin: Springer-Verlag

Menon, A., (Ed.), (2004). *Frontiers of Evolutionary Computation*. New York: Kluwer Academic Prublishers

Mitchell, M., (1998). *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge, MA: MIT Press

Nedjah, N., Alba, E. & de Macedo, L., (Eds.), (2006). *Parallel Evolutionary Computations*. Berlin: Springer-Verlag

Price, K., Storn, R. & Lampinen, J., (2005). *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag

Reck, E. & Al Biles, J., (Eds.), (2007). *Evolutionary Computer Music*. Berlin: Springer-Verlag

Riolo, R., Soule, T. & Worzel, B. (Eds.). (2008). *Genetic Programming: Theory and Practice V*. Berlin: Springer-Verlag

Rothlauf, F. (2006). *Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms*. Segunda edición. Berlin: Springer-Verlag

Tomassini, M. (2005). *Spatially Structured Evolutionary Algorithms: Artificial Evolution in Space and Time. Natural Computing Series.* Berlin: Springer-Verlag.

Yang, S., Ong, Y-S. & Jin, Y., (Eds.), (2007). *Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments*. Berlin: Springer-Verlag

Yang, A., Shan, Y. & Bui, L., T. (Eds.). (2008). *Success in Evolutionary Computation*. Berlin: Springer-Verlag

Yu, T., Davis, D., Baydar, C. & Roy, R. (Eds.). (2008). *Evolutionary Computation in Practice*. Berlin: Springer-Verlag

Zelinka, I., Celikovsky, S., Richter, H., & Chen, G., (Eds.), (2010). *Evolutionary Algorithms and Chaotic Systems*. Berlin: Springer-Verlag

6.4. Inteligencia colectiva o teoría de enjambres

El estudio de los colectivos de animales –los animales sociales, los insectos sociales (hormigas, termitas, himenópteros benéficos en general, pero también de los cardúmenes y las manadas), ha arrojado luces maravillosas acerca de la arquitectura y la topología de la

naturaleza; y por tanto, también acerca de la sociedad humana en general. El rasgo definitivo ha sido el reconocimiento del siguiente hecho: la naturaleza no piensa ni actúa como la civilización occidental los postuló siempre: secuencial, jerárquica, lineal, cardinalmente. Por el contrario, la robustez de los sistemas naturales descansa en series en paralelo, en la ausencia de control central rígido, en la adaptación. La inteligencia de enjambre pone de manifiesto una inteligencia bastante mejor –por robusta y evolutiva- que la inteligencia humana tradicional: la de los 2500 años de la historia de Occidente. Esta idea aún deberá ser plenamente explorada y apropiada por parte de la comunidad académica y científica, así como por parte también del sector privado, el sector público y de la propia sociedad civil.

***

Blum, C., & Merkle, D. (Eds.). (2008). *Swarm Intelligence: Introduction and Applications.* Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag.

Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems.* Oxford: Oxford University Press.

Chan, F. & Tiwari, M K. (Eds.). (2007). *Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*. Vienna: I-Tech

Dorigo, M., & Blum, C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical Computer Science* (344), 243 – 278.

Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimisation.* Cambridge, MA: MIT Press.

Kennedy, J. & Eberhart, R., (2001). *Swarm Intelligence*. San Francisco: Morgan Kauffman

Lazinica, A. (2009). *Particle Swarm Optimization*. Vienna: In-Tech

Lin, C. P., Jain, L. & Dehuri, S. (Eds.). (2009). *Innovations in Swarm Intelligence*. Berlin: Springer-Verlag

Nedjah, N., dos Santos, L. & de Macedo, L., (Eds.), (2010). *Multi-Objective Swarm Intelligent Systems: Theory and Experiences*. Berlin: Springer Verlag

Nedjah, N. & de Macedo Mourelle, L. (Eds.). (2006). *Swarm Intelligent Systems*. Berlin: Springer-Verlag

6.5. Computación con membranas o sistemas P

Los sistemas informáticos y computacionales también han incorporado –por así decirlo- la metáfora biológica y ecológica. La ingeniería ha avanzado hasta la programación y el trabajo en términos de hardware análogos a los de los sistemas vivos. Un caso conspicuo, reciente, que data del 1998, es la computación con membranas.

***

Păun, G. (2006). "Introduction to Membrane Computing". In G. Ciobanu, G. Păun, & M. Pérez-Jiménez (Eds.), *Applications of Membrane Computing, Natural Computing Series* (pp. 1-42). Berlin: Springer-Verlag.

Păun, G. (2005). "Membrane Computing: Power, Efficiency, Applications". In B. Cooper, B. Löwe, & L. Torenvliet (Eds.), *New Computational Paradigms: First Conference on Computability in Europe, CiE 2005 Amsterdam, The Netherlands, June 8-12, 2005 Proceedings* (pp. 396-407). Berlin: Springer Verlag.

Păun, G. (2007). "Tracing Some Open Problems in Membrane Computing". *Romanian Journal of Information Science and Technology , 10* (4), 303–314.

Ciobanu, G., Păun, G., & Pérez-Jiménez, M. (Eds.). (2006). *Applications of Membrane Computing. Natural Computing Series.* Berlin: Springer-Verlag.

6.6. Computación inmune o sistemas inmunes artificiales

El estudio del sistema inmunológico humano –y en general, de los sistemas vivos-, ha representado un aprendizaje estupendo, por lo pronto, para físicos y expertos en sistemas computacionales. Esta área surge en 1998 y permite explorar caminos que la ingeniería tradicional nunca imaginó. Por decir lo menos, se trata de la importancia de pensar por analogía; sin embargo, en rigor, aquí, se trata de bastante más que de una analogía.

***

Dasgupta, D. (Ed.). (1998). *Artificial Immune Systems and Their Applications.* Berlin: Springer-Verlag.

Dasgupta, D., & Attoh-Okine, N. (1997). "Immunity-Based Systems: A Survey". *Proceeding of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1*, pp. 369-374. IEEE.

Dasgupta, D., & Niño, L. F. (2009). *Immunological Computation: Theory and Applications.* Boca Raton: CRC Press.

De Castro, L. N., & Timmis, J. (2002). *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach.* London: Springer-Verlag.

Flower, D. & Timmis, J. (Eds.). (2007). *In Silico Immunology*. Berlin: Springer-Verlag

Mo, H. (2009). *Handbook of Research on Artificial Immune Systems and Natural Computing: Applying Complex Adaptive Technologies*. Hershey: IGI Global

6.7. Complejidad, sistemas bio-inspirados, bio-robótica y bio-hardware

Los trabajos sobre sistemas inteligentes adaptativos y sobre vida artificial ya no permanecen en el ámbito de la pantalla del computador. Los sistemas inteligentes vivos han salido del CPU y ya exploran espacios físicos comunes con el de los seres humanos. De esta suerte, las escisiones clásicas entre lo natural y lo artificial, o entre lo analógico y lo digital, por ejemplo, quedan ampliamente superadas en investigaciones y trabajos que comienzan a tener repercusiones (incipientes, por lo pronto) en numerosos dominios del mundo cotidiano.

***

Gomi, T., (Ed.), (2001). *Evolutionary Robotics: From Intelligent Robotics to Artificial Life: International Symposium, ER 2001, Tokyo, Japan, October 18-19, 2001, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

Higuchi, T., Liu, Y., & Yao, X. (Eds.). (2006). *Evolvable Hardware.* Berlin: Springer-Verlag.

Iba, H. (Ed.). (2008). *Frontiers in Evolutionary Robotics*. Vienna: I-Tech

Negoita, M., & Hintea, S. (2009). *Bio-Inspired Technologies for the Hardware of Adaptive Systems: Real-World Implementatios and Applications.* Berlin: Springer-Verlag.

Sahin, E. & Spears, M., (Eds.), (2005). *Swarm Robotics: SAB 2004 International Workshop, Santa Monica, CA, USA, July 17, 2004, Revised Selected Papers*. Berlin: Springer-Verlag

Wang, L., Tan, K. C., & Chew, C. M. (Eds.). (2008). *Evolutionary Robotics. From Algorithms to Implementations.* Singapore: World Scientific.

Zufferey, J. C., (2008). *Bio-Inspired Flying Robots: Experimental Synthesis of Autonomous Indoor Fliers*. Bocaraton: EPFL Press

7. Complejidad, información y computación

El trabajo en complejidad en los mejores centros de investigación en el mundo no solamente incorpora el estudio y la investigación de los sistemas complejos con base en el trabajan con modelamiento y la simulación, sino, adicionalmente implican de entrada un reconocimiento explícito a la importancia de la computación como forma de investigación en la ciencia contemporánea. En efecto, a título ilustrativo, para poder ser admitidos –como estudiantes de cualquier nivel o como investigadores en formación o consumados, es una condición indispensable demostrar conocimientos de modelamiento y simulación. Desde el surgimiento de las ciencias de la complejidad, el físico H. Pagels se anticipó al señalar que existe una sólida implicación recíproca entre complejidad y computación. Al mismo tiempo que las ciencias de la complejidad son posibles gracias, entre otros factores adicionales, al surgimiento de los sistemas informacionales y computacionales, las ciencias de la complejidad contribuyen, activamente, al desarrollo de la computación. En síntesis: es imposible ser un buen científico –en el sentido al mismo tiempo más amplio, incluyente y riguroso de la palabra- sin conocer y sin trabajar sistemas, temas, problemas computacionales.

***

Ceruzzi, P. (2003). *A History of Modern Computing*. Segunda edición. Cambridge, MA: MIT Press.

Copeland, J. (Ed.). (2004). *The Essential Turing: Seminal Writings in Computing, Logic, Philosophy, Artificial Intelligence, and Artificial Life: Plus The Secrets of Enigma.* Oxford: Oxford University Press.

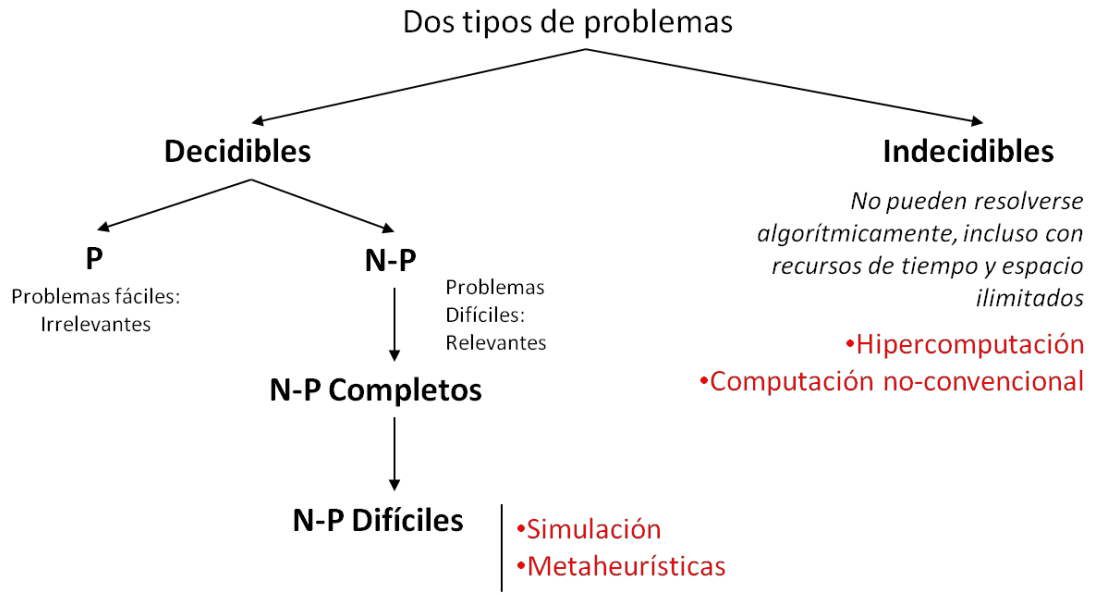
Copeland, J., & Proudfoot, D. (2004). Un Alan Turing Desconocido. *Investigación y Ciencia, Temas 36: La Información* , 29-30.

Ranka, S. et al. (Eds.). (2009). *Contemporary Computing. Second International Conference, IC3 2009, Noida, India, August 17-19, 2009, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

7.1. Complejidad computacional, teoría de la computación, problemas P y NP

La teoría matemática de la complejidad –que es, en rigor, el problema de las relaciones P versus NP, formulado al mismo tiempo pero de manera independiente por Levin, Cook y Karp, es un problema eminentemente lógico. Y por tanto, computacional.

En un marco más amplio pueden identificarse dos tipos de problemas (esquema 16): aquellos que computables y aquellos que no lo son. En el primer caso, se puede distinguir entre problemas que pueden resolverse con un algoritmo determinista en un tiempo polinomial (problemas P) y aquellos que pueden resolverse de forma aproximada con algoritmo no determinista en un tiempo igualmente polinomial (problemas NP). En el segundo caso, se trata de problemas para los cuales el algoritmo que lo resuelve es de tiempo exponencial o bien se trata de problemas para los cuales no se conoce un algoritmo que logre resolverlos. Este problema tiene implicaciones no solamente en el plano lógico y matemático, sino incluso en el del desarrollo del *hardware*. En últimas, el problema conduce, inevitablemente, al ámbito de la computación cuántica, y con ella, a los más sensibles temas de la criptografía.



Esquema 15. Problemas decidibles e indecidibles. Esquema realizado por los autores.

***

Arora, S., and Barak, B., (2009). *Computational Complexity. A Modern Approach*. Cambridge: Cambridge University Press.

Flum, J. and Grohe, M., (2006). *Parameterized Complexity Theory*. Berlin: Springer-Verlag

Goldin, D. and Wegner, P. (2005). The Church-Turing Thesis: Breaking the Myth. In B. Cooper, B. Löwe, and Torenvliet, L., (Eds.). *New Computational Paradigms: First*

Conference on Computability in Europe, CiE 2005 Amsterdam, The Netherlands, June 8-12, 2005 Proceedings (pp. 152-168). Berlin: Springer Verlag.

Goldreich, O., (2008). *Computational Complexity. A Conceptual Approach*. Cambridge: Cambridge University Press

Kozen, D. (2006). *Theory of Computation.* Berlin: Springer-Verlag

Maldonado, C. E., & Gómez Cruz, N. (2009b). Facing N-P Problems via Artificial Life: a Philosophical Appraisal. In *Advances in Artificial Life: 10th European Conference on Artificial Life, ECAL 2009* (pp. --). Berlin: Springer-Verlag.

Parberry, I., (1987). *Parallel Complexity Theory*. London: John Wiley & Sons

Sipser, M. (2006). *Introduction to the Theory of Computation*. Segunda edición. Boston, MA: Thomson

Thierauf, T., (2000). *The Computational Complexity of Equivalence and Isomorphism Problems*. Berlin: Springer-Verlag

Wegener, I., (2005). *Complexity Theory: Exploring the Limits of Efficient Algorithms*. Berlin: Springer Verlag

Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Champaign: Wolfram Research.

Wolfram, S. (1994). Twenty Problems in the Theory of Cellular Automata. In S. Wolfram, *Cellular Automata and Complexity: Collected Papers* (pp. 457-485). Addison-Wesley.

Wolfram, S. (1984). Universality and Complexity in Cellular Automata. *Physica 10D* , 1-35.

7.2. Nuevos modelos de computación, nuevos paradigmas de programación, computación no estándar, computación no convencional e hipercomputación

La arquitectura de la computación de von Neumann ya queda atrás. Hacia delante se mira otras arquitecturas. Ellas implican, adicionalmente, un nuevo y distinto modo de computar. Ulteriormente –ya anticipado por la teoría matemática de la complejidad-, el tema o el problema de base es la criptografía. Hoy van ganando los encriptadores. Pero ya todos sabemos que su tiempo es finito. En el momento en el que triunfen los decriptadores será justamente el triunfo se la computación no-convencional y de la hipercomputación. Esta es, sin ningún lugar a dudas, la frontera de trabajo e investigación en un ámbito en el que convergen al mismo tiempo la lógica, las matemáticas, los sistemas informacionales, la computación, la biología, las finanzas, el comercio internacional, los sistemas militares, el pensamiento estratégico e incluso la filosofía.

***

Adamatzky, A. & Teuscher, C., (Eds.), (2006). *From Utopian to Genuine Un conventional Computers*. Luniver Press

Adamatzky, A., De Lacy-Costello, B. & Asai, T., (2005). *Reaction-Diffusion Computers*. Amsterdam: Elsevier

Adamatzky, A., De Lacy-Costello B., Bull, L., Stepney, S., & Teuscher, C. (Eds.). (2007). *Unconventional Computing 2007*. Frome: Luniver Press

Amos, M., (Ed.), (2004). *Cellular Computing*. Oxford: Oxford University Press

Amos, M., (2005). *Theoretical and Experimental DNA Computation.* Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag.

Bernardini, F., Gheorghe, M., Krasnogor, N., & Terrazas, G. (2005). Membrane Computing: Current Results and Future Problems. In B. Cooper, B. Löwe, & L. Torenvliet (Eds.), *First Conference on Computability in Europe, CiE 2005* (pp. 49-53). Berlin: Springer-Verlag.

Calude, C., Dinneen, M., Păun, G., Pérez-Jiménez, M. & Rozenberg, G., (Eds.), (2005). *Unconventional Computation: 4th International Conference, UC 2005, Sevilla, Spain, October 3 – 7, 2005, Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag

Chen, J., Jonoska, N. & Rozenberg, G. (Eds.), (2006). *Nanotechnology: Science and Computation*. Natural Computing Series. Berlin: Springer Verlag

Cooper, B., Löwe, B. & Sorbi, A. (Eds.). (2008). *New Computational Paradigms: Changing Conceptions of What is Computable*. Berlin: Springer-Verlag.

Cooper, B., Löwe, B. & Torenvliet, L. (Eds.). (2005). *New Computational Paradigms: First Conference on Computability in Europe, CiE 2005 Amsterdam, The Netherlands, June 8-12, 2005 Proceedings*. Berlin: Springer-Verlag.

Dittrich, P. (2005). Chemical Computing. In J.-P. Banâtre, P. Fradet, J.-L. Giavitto, & O. Michel (Eds.), *Unconventional Programming Paradigms* (pp. 19-32). Berlin: Springer-Verlag.

Dittrich, P., Ziegler, J., & Banzhaf, W. (2001). Artificial Chemistries: A Review. *Artificial Life , 7* (3), 225-275.

Fernández, M. (2009). *Models of Computation: An Introduction to Computability Theory.* Berlin: Springer Verlag.

Gramβ, T., Bornholdt, S., Groβ, M., Mitchell, M. & Pellizzari, T., (1998) *Non-Standard Computation: Molecular Computation - Cellular Automata - Evolutionary Algorithms - Quantum Computers*. Weinheim: Wiley VCH

Gueorgue, M., (Ed.), (2005). *Molecular Computational Models: Unconventional Approaches*. Convent Garden: Idea Group

Hirvensalo, M., (2004). *Quantum Computing*. Natural Computing Series. Segunda edición. Berlin: Springer-Verlag

Ignatova, Z., Martínez-Pérez, I. & Zimmermann, K. H. (2008). *DNA Computing Models*. Berlin: Springer-Verlag

Löwe, B., Piwinger, B. and Räsch, T., (Eds.), (2004). *Classical and New Paradigms of Computation and Their Complexity Hierarchies*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers

Păun, G., (2005). Membrane Computing: Power, Efficiency, Applications. In B. Cooper, B. Löwe, & L. Torenvliet (Eds.), *New Computational Paradigms: First Conference on Computability in Europe, CiE 2005 Amsterdam, The Netherlands, June 8-12, 2005 Proceedings* (pp. 396-407). Berlin: Springer Verlag.

Păun, G., (2007). Tracing Some Open Problems in Membrane Computing. *Romanian Journal of Information Science and Technology , 10* (4), 303–314.

Sipper, M., (1990). The Emergence of Cellular Computing. *IEEE Computer* , 18-26.

Sipper, M., (1997). *Evolution of Parallel Cellular Machines: The Cellular Programming Approach*. Berlin: Springer-Verlag

Syropoulos, A. (2008). *Hypercomputation: Computing Beyond the Church-Turing Barrier.* Berlin: Springer-Verlag.

Tanya, S., Adamatzky, A., Rambidi, N. & Conrad, M., (Eds.), (2003). *Molecular Computing*. Cambridge, MA: MIT Press

Teuscher, C. (2009). Cellular Computing. In R. Meyer (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (pp. 922-936). Berlin: Springer Verlag.

Teuscher, C. & Adamatzky, A., (Eds.), (2005). *Unconventional Computing 2005: From Cellular Automata to Wetware*. Luniver Press

Würtz, R. (Ed.). (2008). *Organic Computing.* Berlin: Springer Verlag.

7.3. Teoría algorítmica de la información

Gregory Chaitin ocupa un lugar propio en el contexto de las ciencias de la complejidad. Ese lugar es el de la teoría algorítmica de la información. De la obra, profusa, de Chaitin, conocemos y hemos trabajado sobre los textos referidos a continuación.

Por su parte, Zurek tiene contribuciones fundamentales a la medición de la entropía, aun cuando recientemente se ha concentrado en temas relacionados con la física cuántica en general.

***

Chaitin, G. J., (1998). *The Limits of Mathematics*. Springer Verlag

Chaitin, G. J., (1999). *The Unknowable*. Springer Verlag

Chaitin, G., J. (2001). *Exploring Randomness*. Springer Verlag

Chaitin, G. J., (2002). *Conversations with a Mathematician. Math, Art, Science and The Limits of Reason*. Springer Verlag

Chaitin, G. J., (2007). *Meta Maths. The Quest for Omega*. London: Atlantic Books

Chaitin, G. J., (2007). *Thinking About Gödel and Turing. Essays on Complexity, 1970-2007*. World Scientific

Zurek, W. J., (1990). *Complexity, Entropy and the Physics of Information*. Westview Press

8. Complejidad en otros campos

8.1. Complejidad y educación

El panorama de la educación está dominado actualmente por el libro famoso de E. Morin sobre los siete saberes. La comunidad de educadores, pedagogos y filósofos de la educación no conoce más referentes. Pues bien, los libros mencionados inmediatamente se sitúan en la atmósfera de las ciencias de la educación. Hay que decir que, hasta la fecha, el mayor trabajo en el mundo sobre complejidad y educación se lleva a cabo en la Universidad de Alberta, en Canadá. Por decir lo menos, existen alternativas serias a las relaciones en educación, pedagogía y pensamiento complejo. Los dos libros mencionados a continuación expresan un equipo serio de trabajo que, aunque reciente, avanza en la dirección correcta.

***

Avis, B., Sumara, D., (2006). *Complexity and Education. Inquiries into Learning, Teaching, and Research*. Mahwah, NJ, London: Lawrence Erlbaum Ass. Publ.

Bar-Yam, Y. (2004). *Making Things Work. Solving Complex Problems in A Complex World*. NECSI-Knolwedge Press

Mason, M., (2008). *Complexity Theory and The Philosophy of Education*. Wiley-Blackwell

8.2. Complejidad y religión

Ciencia y religión. Un debate siempre abierto. Particularmente a partir del presupuesto inaugurado por los Pitagóricos y transmitido después por Platón y Aristóteles y toda la tradición occidental según la cual existirían conocimientos mejores que otros, y consiguientemente una jerarquía de saberes y discursos. Desde una perspectiva budista y por tanto abierta, y otra católica, los libros referidos en esta sección dan cuenta de las posturas y las posibilidades para el tema: complejidad y religión.

***

Varela, F., y Hayward, J. (Eds.), (1997). *Un puente para dos miradas. Conversaciones con*

el Dalai Lama sobre las ciencias de la mente. Santiago de Chile: Editorial Dolmen

Varela, F.,, (Ed.), (1999). *Dormir, Soñar, Morir. Nuevas conversaciones con el Dalai Lama.* Santiago de Chile: Editorial Dolmen

Pickard, S., (2004). *Creation and Complexity: Interdisciplinary Issues in Science and Religion* (Science & Theology). ATF Press

8.3. Complejidad y sistemas militares

Los sistemas militares en general –por ejemplo, los estudios de insurgencia y contrainsurgencia, conflictos militares, guerras de tercera y de cuarta generación, ciencia y tecnología para la defensa y otros semejantes-, han sido uno de los primeros interesados en el estudio de las ciencias de la complejidad. Hay que decir que Estados Unidos, Inglaterra, Canadá, Francia, Alemania y la China, al mismo tiempo que Japón, y Brasil (hasta donde tenemos información), trabajan activamente en este campo. Pero también hay que decir que diversos ejércitos rebeldes en el mundo también conocen y hacen uso de herramientas de complejidad. Un breve pero sólido panorama al respecto está reseñado y estudiado en los libros que se mencionan a continuación.

***

Alberts, D. & Czerwinski, T. (Eds.). (1997). *Complexity, Global Politics, and National Security*. Washington, D.C.: National Defense University

Bar-Yam, Y. (2004). *Making Things Work. Solving Complex Problems in A Complex World*. NECSI-Knolwedge Press

Ilachinsky, A. (2004). *Artificial War: Multiagent-Based Simulation of Combat.* Singapore: World Scientific.

8.4. Complejidad, arte y estética

Hubo un tiempo en el que la estética formaba parte de la filosofía (incluso de la metafísica). Hoy la estética –análogamente a la mayoría de ciencias y disciplinas desde la modernidad- ya no pertenece al ámbito de la filosofía. Ha cobrado vida propia. Mejor aún, el arte no tiene una relación uno a uno con la estética y, por consiguiente, la estética ya no tiene como problema simplemente a la belleza. Pues bien, las ciencias de la complejidad pueden comenzar a decir algo al respecto.

***

Tiezzi, E., (2006). *La belleza y la ciencia. Hacia una visión integradora de la naturaleza*. Barcelona: Icaria

Casti, J., (1998). “Complexity and Aesthetics”, en: *Complexity*, Vol 3, No. 5, May, págs. 11-16

Casti, J. & Karlqvist, A. (Eds.). (2003). *Art and Complexity*. Amsterdam: Elsevier

Plemenos, D. & Miaoulis, G. (2009). *Visual Complexity and Intelligent Computer Graphics Techniques Enhancements*. Berlin: Springer-Verlag

Reck, E. & Al Biles, J., (Eds.), (2007). *Evolutionary Computer Music*. Berlin: Springer-Verlag

Romero, J. & Machado, P., (Eds.), (2008). *The Art of Artificial Evolution: A Handbook on Evolutionary Art and Music*. Natural Computing Series. Berlin: Springer-Verlag

Whitelaw, M., (2004). *Metacreation, Art and Artificial Life*. Cambridge, MA: MIT Press

8.5. Complejidad y medicina

La medicina en general y las ciencias de la salud en general tiene un trabajo serio en torno a, y sobre la base de, las ciencias de la complejidad. Existe una numerosa bibliografía al respecto, principalmente de artículos científicos; artículos sobre complejidad, caos y cardiopatías; caos, complejidad y neurociencias; epidemias y redes complejas; epidemiología, sistemas dinámicos y complejidad; en fin, medicina, nueva biología y termodinámica del no-equilibrio, entre numerosos otros campos y estudios. Remitimos, mejor, a las mejores revistas científicas de medicina en general y de cardiología, estudios de cáncer, y otros. Debido al carácter de artículos científicos y sobre la base de la advertencia que hicimos al comienzo de esta investigación, pasamos por alto aquí los numerosos detalles bibliográficos.

Como libros, conocemos y hemos trabajado los tres siguientes. Un lugar propio merece el trabajo publicado por la UNAM que da muestra de un riguroso tratamiento de las ciencias de la complejidad en el mundo hispano-hablante. No deja de ser curioso que los tres libros referidos inmediatamente a continuación sean ubicados en el mismo año, 2006.

***

Deisboeck, T. & Kresh, J. Y., (Eds.), (2006). *Complex Systems Science in Biomedicine.* Berlin: Springer-Verlag

Maldonado, C.E., (2008). “La complejidad de la salud. Interacciones entre lo biológico y lo social”. En: María Carolina Morales (Ed.). *Repensando la naturaleza social de la salud en las sociedades contemporáneas. Perspectivas, retos y alternativas*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 96-108

Ruelas Barajas, E., Mansilla, R., Rosado J., (Coords.), (2006). *Las ciencias de la complejidad y la innovación médica. Ensayos y modelos*. México, D.F.: UNAM

(Secretaría de Salud e Instituto de Física del Centro de Investigaciones Interdisciplinarias)

West, B. (2006). Where *Medicine Went Wrong: The Discovering the Path to Complexity*. Singapore: World Scientific

9. Complejidad en Colombia

Colombia tiene un trabajo serio en ciencias de la complejidad. De una parte, es ya un hecho altamente significativo que exista CEIBA, un Centro de Excelencia sobre estudios (básicos y aplicados) sobre sistemas complejos, con la participación de la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de los Andes, la Pontificia Universidad Javeriana y la Universidad del Rosario. Este centro está reseñado en los Centros e Institutos, más abajo.

Asimismo, existe una producción sostenida de varios investigadores. Y, muy importante, existe un proceso serio de formación de jóvenes investigadores a nivel de Maestría y de Doctorado que cada vez se enteran y ocasionalmente se dedican a la complejidad en áreas distintas que abarcan desde la computación y la ingeniería hasta la física, desde las ciencias humanas hasta la política, desde la bioética hasta la biología, por ejemplo.

Aunque de bajo perfil todavía, se vienen realizando una serie de encuentros, así: Encuentro Interuniversitario de Complejidad, animado inicialmente por la Universidad Distrital "Francisco José de Caldas", la Universidad Javeriana y la Universidad del Rosario. Ya se han realizado cinco encuentros con regularidad anual, habiendo producido varios libros. Otros eventos similares, locales, están en marcha en distintos lugares (la Costa Atlántica, la región Cafetera: Manizales, Pereira, Armenia).

Con nombre propio, existen investigadores dedicados, según su área, a la complejidad: Marco Aurelio Alzate, ingeniero; Nelson Obregón, N., ingeniero; Jorge Villamil, ingeniero. Pero la producción más importante es la que se reseña a continuación.

Una observación importante merece destacarse aquí. El grupo del doctorado en ingeniería de la Universidad de los Andes, que dirige Robeto Zarama trabaja ciencias de sistemas. Sin embargo, la producción es de la más alta calidad, incluidos varios artículos en revistas tan prestigiosas como *Science* y *Nature*. Ya hemos dicho varias cosas antes acerca de las relaciones entre teorías sistémicas y complejidad.

9.1. Principales textos sobre complejidad en el país

El primer libro que se publica sobre complejidad en Colombia es del año 1999 (con segunda edición en el 2001). Sin embargo, el trabajo sobre complejidad en Colombia fue

inaugurado de manera consistente por dos libros de J. F. Isaza y D. Campos. En biología, reconocido por sus estudiantes y colegas, el trabajo de E. Andrade no encuentra ningún parangón en el país e incluso a nivel latinoamericano.

***

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

Andrade, E., (2009). *La Ontogenia del Pensamiento Evolutivo*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia

Forero, E, López, C. E. & Maldonado, C. E., (Eds.), (2009b). *Complejidad de la Arqueología y el Turismo Cultural: Territorios, Sostenibilidad y Patrimonio*. Bogotá, Editorial Universidad del Rosario

Isaza, J. F., Campos Romero, D., (2006), Ecología: una mirada desde los sistemas dinámicos. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana

Isaza, J. F., Campos Romero, D., (2002). *Prolegómenos a los Sistemas Dinámicos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia

Maldonado, C. E., (Ed.), (2009). *Complejidad: Revolución Científica y Teoría*. Bogotá, Editorial Universidad del Rosario

Maldonado, C. E., (Ed.), (2007). *Complejidad: Ciencia, Pensamiento y Aplicaciones*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia

Maldonado, C. E., (2005) *Termodinámica y Complejidad. Una Introducción para las Ciencias Sociales y Humanas*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia

Maldonado, C. E., (Ed.), (2005). *Complejidad de las Ciencias y Ciencias de la Complejidad*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.

Maldonado, C. E., (Ed.), (2001). *Visiones sobre la complejidad*, 2ª Edición, Colección "Filosofía y Ciencia" No. 1, Bogotá: Universidad del Bosque

Maldonado, C. E. & Gómez Cruz, N., (2010). *Modelamiento y Simulación de Sistemas Complejos*, Documento de Investigación. Bogotá: Universidad del Rosario.

10. Centros de investigación, revistas, series de libros y eventos

La formación y el trabajo en ciencias de la complejidad tienen lugar al cabo de la formación de los investigadores. Así nacieron las ciencias de la complejidad y así han permanecido hasta la fecha. La historia de los primeros Centros e Institutos mencionada en la Introducción a este libro es bastante ilustrativa al respecto. Al fin y al cabo los mejores investigadores en el mundo forman parte de estas instancias académicas e investigativas.

La lista que se presenta aquí abajo hace referencia a, quizás, los más destacados centros e institutos de investigación en el mundo, hoy por hoy. Ahora, desde luego que a esta lista habría que incluir el centro de complejidad de la Universidad de Gotteburg (Suecia), los institutos creados por el gobierno chino que trabajan mano a mano, por ejemplo, en los cursos de verano paralelos, con el SFI, o el Instituto Técnico de Viena.

En América Latina, merece un lugar especial el Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM. Es, de lejos, el mejor, y nada comparable existe en ninguno de los otros países de Latinoamérica. Sería deseable que las Universidades del continente despertaran alguna sensibilidad al respecto.

En este cuadro, la experiencia más atrevida, a nuestro modo de ver, y por consiguiente más innovadora, es la red de complejidad organizada en Francia. En Estados Unidos no se encuentra una experiencia semejante.

10.1. Principales centros de investigación sobre complejidad en el mundo

El trabajo en complejidad es definitivamente interdisciplinar. Tal es, exactamente, la marca de la complejidad. Un investigador como R. García sostiene incluso que la interdisciplinariedad es el método mismo del trabajo en ciencias de la complejidad.

Con todo, la organización del conocimiento en el mundo entero sigue siendo paquidérmica. En el mundo entero el conocimiento todavía, predominantemente, se organiza en términos de Facultades, Carreras, Departamentos y Programas. Y siempre con un claro talante

disciplinar. Los gestores del conocimiento –rectores, vicerrectores, decanos y directores de departamentos- aún no terminan de incorporar la interdisciplinariedad en toda la línea de la palabra. Acaso debido a que "el mercado" tampoco ha salido de la formación disciplinar.

***

Santa Fe Institute, New Mexico, USA. http://www.santafe.edu/

New England Complex Systems Institute (NECSI), Cambridge, MA, USA. http://necsi.org/

Center for the Study of Complex Systems, University of Michigan. Fue fundado por el famoso grupo BACH, cuyos miembros eran: Arthur Burks, Bob Axelrod, Michael Cohen y John Holland. http://www.cscs.umich.edu/

Réseau National des Systèmes Complexes (RNSC), Francia. http://rnsc.fr

Institut des Systèmes Complexes de Paris Île-de-France (ISC-PIF), Francia. http://iscpif.fr

Institut des Systèmes Complexes Rhône-Alpes (ISC-PIF), Francia. http://ixxi.fr

Center for the Study of Biological Complexity, Virginia Commonwealth University. http://www.vcu.edu/csbc/

Center for Complex Systems Research, University of Illinois. http://www.ccsr.uiuc.edu/index.html

Complex Adaptive Systems Group, Iowa State University. http://www.cs.iastate.edu/~honavar/alife.isu.html

Complex Systems Group, University of Alaska. http://www.uaa.alaska.edu/complexsystems/

Center for Social Complexity, George Mason University. http://socialcomplexity.gmu.edu/

Complex Systems Laboratory, Université de Montréal. http://www.geog.umontreal.ca/syscomplex/eng/home.html

Evolutionary and Adaptive Systems (EASy), University of Sussex. http://www.informatics.sussex.ac.uk/research/groups/easy/index.html

Institute for the Study of Complex Systems (ISCS). http://www.complexsystems.org/

LSE Complexity Group, Londres. http://www.psych.lse.ac.uk/complexity/

Evolution, Complexity & Cognition Group (ECCO), Universidad Libre de Bruselas. http://pcp.lanl.gov/EVOLCOMP/

System of Systems Engineering Center of Exellence, Johnstown, PA, USA. http://www.sosece.org/

Human Complex Systems (ISC-PIF), University of California, Los Angeles, USA. http://hcs.ucla.edu/

Bristol Center for Applied Nonlinear Mathematics, University of Bristol. http://www.enm.bris.ac.uk/anm/

Chaos UMD, University of Maryland. http://www-chaos.umd.edu/chaos.html

Institute for Nonlinear Science, University of California, San Diego, USA. http://inls.ucsd.edu/

Centro de Ciencias de la Complejidad, Universidad Nacional Autónoma de México. http://c3.fisica.unam.mx/

Centro de Estudios Interdisciplinarios Básicos y Aplicados en Complejidad (CeiBA-Complejidad), Colombia. http://www.ceiba.org.co/

UCL Complex, University College London, London. http://www.ucl.ac.uk/complex/

Complexity & Management Centre, Business School of the University of Hertfordshire. http://complexityandmanagement.wordpress.com/

The Complexity & Artificial Life Research Concept (CALRESCO). http://www.calresco.org/index.htm

Institute for the Study of Coherence and Emergence (ISCE). http://www.isce.edu/

10.2. Revistas especializadas sobre complejidad

En el mundo de las ciencias de la complejidad sucedió una circunstancia diferente a la de la ciencia normal. La complejidad surge con libros y con eventos, y sólo después –la mayoría hacia el año 2000- se crean las revistas especializadas. Ahora bien, es cierto que la mejor producción se publica en revistas especializadas. Pero es igualmente verdad que en ciencias de la complejidad el proceso no ha obedecido el canon de la gestión del conocimiento de la ciencia normal.

De las revistas reseñadas a continuación, la tercera es, sin lugar a dudas, la principal revista en complejidad; publica habitualmente artículos cortos, últimamente en números monográficos. Una mirada reflexiva a esta revista permite apreciar, además, el espectro de los países, grupos, campos y problemas trabajados en complejidad. Las revistas relacionadas con administración y organizaciones son un tanto irregulares en periodicidad y su calidad no es comparable con la revista *Complexity* o con *Journal of Complexity*.

A esta lista de las revistas dedicadas a complejidad habría podido añadirse una lista –bastante más grande, en diversos dominios del conocimiento- que está francamente abierta a artículos de complejidad, en español, en inglés y en portugués. No se incluye, sin

embargo, esta lista, dado que no está enteramente definida en torno a las ciencias de la complejidad.

***

Advances in Complex Systems (ACS). Editor World Scientific. ISSN 0219-5259 (print) 1793-6802 (online)

Complex Systems. Publicada por Complex Systems Publication, Inc. ISSN 0891-2513

Complexity, ISSN 1076-2787 ISSN en línea 1099-0526, editor Wiley Blackwell

Complexity and Innovation in Organizations, editor Taylor & Francis Group

Complexity and Management, editor Taylor & Francis Group

Complexity and the History of Ecomic Thought, editor Taylor & Francis Group

Complexity International, ISSN 1320-0682, editor Monash University

Computational Complexity. Publicada por Birkhäuser Basel, ISSN: 1016-3328 (Print) 1420-8954 (Online)

Ecological Complexity. Publicada por Elsevier. ISSN 1476-945X

Emergence: Complexity & Organization (E:CO). Publicada por Wiley Periodicals, Inc. ISSN 1521-3250 (print) 1532-7000 (online)*International Journal of Complexity in Applied Science and Engineering (IJCASE).* Publicado por InderScience Publishers. ISSN 1740-0554 (Online) 1740-0546 (Print)

InterJournal. Publicada por el New England Complex Systems Institute. ISSN: 1081-0625

Journal of Complexity, ISSN 0885-064X ISSN en línea 1090-2708, editor Elsevier Inc NY Journals

Journal of Nonlinear Science. Publicada por Springer New York. ISSN 0938-8974 (print) 1432-1467 (online)

Journal of Social Complexity. Publicada por Bandung Fe Institute. ISSN 1829-6041

Journal of Systems Science and Complexity. Publicada por la Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, co-publicada con Springer-Verlag. ISSN: 1009-6124 (Print) 1559-7067 (Online)

10.2.1. Otras revistas relacionadas con complejidad

Las revistas que se mencionan a continuación tienen que ver con varios de los campos que nacen y se alimentan de complejidad. En esta lista hubiéramos debido incluir varias de las revistas de la base de datos de la IEEE que admiten, sin dilaciones, artículos relacionados con computación bio-inspirada, lógicas no-clásicas y computación no convencional. La razón por la que no le dedicamos un título propio es debido a su carácter abierto a ingeniería, ciencia, programación y computación tradicionales.

***

Adaptive Behavior. Editor SAGE Publications. ISSN 1059-7123 (print) 1741-2633 (online)

Artificial Life. Publicada por MIT. ISSN 1064-5462 (print) 1530-9185 (online)

Artificial Life and Robotics. Publicada por Springer Japan. ISSN 1433-5298 (Print) 1614-7456 (Online)

Evolutionary Intelligence. Publicada por Springer Berlin / Heidelberg. ISSN 1864-5909 (Print) 1864-5917 (Online)

Evolving Systems. Publicada por Springer Berlin / Heidelberg. ISSN 1868-6478 (Print) 1868-6486 (Online)

Journal of Artificial Societies and Social Simulation. Publicada por University of Surrey. ISSN 1460-7425

Natural Computing. Publicada por Springer Netherlands. ISSN: 1567-7818 (Print) 1572-9796 (Online)

Nonlinear Analysis: Modelling and Control. Publicado por Lithuanian Association of Nonlinear Analysts. ISSN: 1392-5113

Memetic Computing. Publicada por Springer Berlin / Heidelberg. ISSN: 1865-9284 (Print) 1865-9292 (Online)

10.3. Series de libros sobre complejidad

Tres prestigiosas editoriales se destacan con nombre propio por tener series dedicadas exclusivamente a complejidad: Springer Verlag, Cambridge University Press y Princeton University Press. Ahora, hay que decir el Instituto Santa Fe (SFI) dejó de editar sus libros con Perseus Group y logró un acuerdo con Oxford University Press. Esta editorial, sin embargo, no ha creado una serie dedicada exclusivamente a complejidad aunque edite los mejores libros del SFI y muchos sobre varios de los temas y secciones incluidos en este estado del arte. A nivel mundial las tres principales editoriales de temas sobre complejidad

son: Cambridge University Press, Oxford University Press y WorldScientific (que tiene una colección sobre "ciencia no lineal").

Recientemente, en español, la Editorial de la Universidad del Rosario (Bogotá, Colombia) creó la primera colección dedicada a complejidad – "Colección Complejidad", al interior de los libros que publica de la Facultad de Administración. Hasta donde tenemos información, esta es la primera colección de complejidad en América Latina.

***

Cambridge Nonlinear Science Series. Publicada por Cambridge University Press.

Colección Complejidad. Editorial Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia.

Complex Systems and Interdisciplinary Science. Publicada por World Scientific.

Lecture Notes in Complex Systems. Publicada por World Scientific.

Princeton Studies in Complexity. Publicada por Princeton University Press.

Serie Metatemas. Publicada por Tusquets editores.

Understanding Complex Systems. Publicada por Springer Berlin / Heidelberg.

10.4. Eventos sobre complejidad y campos afines

La internacionalización de los eventos sobre ciencias de la complejidad muestra un vigor admirable. Varios eventos se cruzan y son numerosos los investigadores que, en el circuito de conferencias, participan en varios de los eventos referidos a continuación. Las principales universidades del mundo –por ejemplo, atendiendo a la lista de las 500 Universidades de la lista de Shanghai- participan y organizan varios de estos eventos.

En ellos, es evidente la participación de investigadores del sector privado, del sector público y de la sociedad civil.

***

Asia-Pacific Complex Systems Conference

Complex Systems Design & Management (CSDM)

European Conference on Complex Systems (ECCS)

IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems

International Conference on Complex Sciences (COMPLEX)

International Conference on Complex Systems

International Conference on Complex Systems Engineering (ICCSE)

10.4.1. Vida artificial

International Conference on Artificial Life (ALife)

European Conference on Artificial Life (ECAL)

German Workshop on Artificial Life (GWAL)

International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB)

Italian Workshop on Artificial Life (WIVA)

Australian Conference on Artificial Life (ACAL)

Regional Conference on Artificial Life and Robotics -Tailandia-

European Workshop on Artificial Life and Robotics

IEEE Symposium on Artificial Life (IEEE-ALife)

International Conference on Life System Modeling and Simulation (LSMS)

10.4.2. Computación evolutiva, hardware evolutivo y robótica evolutiva

Genetic and Evolutionary Computation conference (GECCO)

IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)

International Conference on Evolutionary Computing (EC)

European Conference on Evolutionary Computation (EvoBIO)

European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (EVOCOP)

International Workshop on Genetic and Evolving Fuzzy Systems (GEFS)

Asia-Pacific Workshop on Genetic Programming (ASPGP)

International Workshop on Foundations of Genetic Algorithms (FOGA)

Euro-Genetic-Programming Conference (EuroGP)

Workshop on Genetic Programming Theory and Practice (GPTP)

European Conference on Artificial Evolution (AE)

International Conference on Evolvable Systems (ICES)

NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware (EH)

NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS)

10.4.3. Inteligencia de enjambres

IEEE Swarm Intelligence Symposium

International Conference on Swarm Intelligence (ICSI)

International Conference on Computational Collective Intelligence (ICCCI)

International Workshop on Ant Colony Optimization ans Swarm Intelligence (ANTS)

Workshop on Collective Intelligence on Semantic Web (CISW)

10.4.4. Sistemas inmunes artificiales

International Conference on Artificial Immune Systems (ICARIS)

10.4.5. Autómatas celulares

International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI)

International Workshop on Cellular Automata (AUTOMATA)

10.4.6. Computación molecular

Workshop on Membrane Computing (WMC)

International Workshop on Computational Models for Cell Processes (CompMod)

Workshop on Membrane Computing and Biologically Inspired Process Calculi

Workshop on Computational Models for Cell Processes

The International Meeting on DNA Computing (DNA)

International Workshop on Computing with BioMolecules (CBM)

10.4.7. Computación natural

International Conference on Natural Computation (ICNC)

International Workshop on Natural Computing (IWNC)

International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)

World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC)

International Workshop on Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO)

Conference on Biocomputing and Emergent Computation (BCEC)

The International Workshop Bio-Inspired Computing and Communications (BICC)

10.4.8. Inteligencia Computacional

International Conference on Computational Intelligence (ICCI)

International Conference on Computational Intelligence and Cognitive Informatics (ICCICI)

10.4.9. Sistemas bio-inspirados

International Symposium on Bioinformatics Research and Applications (ISBRA)

International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO)

International Conference on Adaptive and Intelligent Systems (ICAIS)

International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN)

International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (BIONETICS)

The European Symposium on Artificial Neural Networks (ESANN)

International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS)

10.4.10. Modelamiento, simulación y agentes

European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS)

IEEE International Conference on Social Computing (SocialCom)

Complex Systems Modelling and Simulation Workshop

10.4.11. Computación no-convencional

Workshop on Emergent Computing (EmC)

International Conference on Unconventional Computation (UC)

IEEE workshop on Organic Computing (IEEE-OC)

10.4.12. Bioinformática

IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (IEEE BIBM)

10.5. Sociedades sobre complejidad

El mundo de las ciencias de la complejidad es nuevo, reciente, joven. Y sin embargo, la existencia de distintas sociedades sobre complejidad es una señal más que suficiente acerca del interés –múltiple- acerca de la complejidad. Con seguridad, con total seguridad, se trata de un campo promisorio. Quien aún deberá atraer a la mayoría de la comunidad académica y científica. Pero cuando ello suceda, si es que llega a tener lugar, las ciencias mismas se habrán transformado. Y con ellas, el destino mismo de la humanidad, y de la vida sobre el planeta. Somos optimistas al respecto.

***

Complex Systems Society. http://css.csregistry.org/tiki-index.php

ASSYST complex systems Society. http://www.assystcomplexity.eu/

International Society for Complexity, Information, and Design (ISCID). http://www.iscid.org/

The Complexity Society, Business School, University of Hertfordshire, UK. http://www.complexity-society.com/

International Society for Adaptive Behavior. http://www.isab.org/

International Society of Artificial Life. http://www.alife.org/

Postfacio

Debemos hacer una observación fundamental de salida. Hemos elaborado una investigación que presenta el estado del arte y las diversas dimensiones del mundo de la complejidad; de las ciencias de la complejidad, en rigor. En este trabajo hubiéramos debido mencionar –no cabe la menor duda- una serie de autores que se encuentran entre los pilares o los antecedentes de las ciencias de la complejidad. La siguiente lista quiere ser, sencillamente, un reconocimiento, de todos aquellos, que, *de manera directa*, contribuyeron al surgimiento de las ciencias de la complejidad; sin ellos no habrían sido posible el mundo de los sistemas dinámicos de complejidad creciente. En orden cronológico, ellos son:

Henri Poincaré,

David Hilbert,

Alan Turing,

Kurt Gödel,

John von Neumann,

Stephen Smale,

Per Bak.

Este estado del arte corresponde a un proyecto de investigación fundamental en el que participamos con varios amigos y colegas en el trabajo de creación y fortalecimiento de una red de trabajo en complejidad a nivel nacional e internacional.

Ahora bien, este estado del arte implica desde ya una segunda versión que estará enteramente dedicada al estudio de indicadores de cienciometría y de epistemometría (una propuesta novedosa de N. Rescher que no ha sido atendida por organismos públicos o privados de cienciometría hasta la fecha). Planeamos esta segunda versión para dentro de un año, aproximadamente. Sin embargo, es claro que de aquí allá habrá nueva producción intelectual en estos y, seguramente, en otros campos. De suerte que, al mismo tiempo que actualizaremos este trabajo sistemáticamente, también estará acompañado por el esfuerzo de cienciometría, atendiendo al mismo tiempo al diálogo cruzado de los Manuales de Frascati, Canberra, Oslo, Bogotá y Lisboa (y lo que eventualmente haya de seguirse de

ellos). Queremos así, hacer una contribución a la comunidad académica y científica continuada en el tiempo.

Entre tanto, como es habitual en estos casos, deberemos seguir con nuestros propios compromisos de producción intelectual y académica. Numerosos compromisos –al mismo tiempo laborales, académicos, científicos, intelectuales y personales- nos impelen a distintos trabajos; unos en paralelo, otros, secuencialmente; pero siempre, todos, estrechamente relacionados. El mundo académico, científico, laboral y personal demanda la inteligencia, de parte de los investigadores, para elaborar equilibrios dinámicos que le permitan conservar los compromisos, cumplir con determinadas obligaciones y producir libre y creativamente, a la vez, distintos trabajos. Ya lo sabemos, suficientemente: artículos científicos, conferencias, clases, ponencias capítulos de libro(s), libros – todo ello a la vez que el trabajo con modelamientos y simulaciones.

El ritmo de avance de la ciencia es apasionante, pero desbocado a la vez. Mantener el paso a la producción intelectual en curso se torna complicado, pero no caben excusas de ninguna clase. La biografía es el momento en el que se resuelven y se encuentran esas distintas tensiones. *Tensión esencial* se ha traducido una expresión –original de F. Capra- cuyo título original es *The Turning Point*.

Es cierto que la ciencia –en general- avanza hoy en día a través de redes –redes nacionales e internacionales-. Pero es igualmente cierto que ahora más que nunca el trabajo de escritura –en general- implicó, como siempre, una cultura de la soledad, de la reflexión, de la meditación, de la escritura, justamente. La inteligencia se dirime hoy en día como el balance o la tensión entre redes (= circuitos de conferencias, colaboraciones de evaluación, comités académicos y científicos e incluso algún cargo –provisional, siempre- de tipo administrativo), y el trabajo aislamiento, reserva y reflexión. Nunca las oportunidades habían sido mejores.