

# Consecuencias políticas de la complejidad

Carlos Eduardo Maldonado\*

## Resumen

En el mundo, cada día son más los estudios y trabajos sobre complejidad; sin embargo, no existe ninguno que explícitamente considere las implicaciones políticas de estudiar los fenómenos complejos no lineales. En esta ocasión, se exploran algunas de las más importantes consecuencias políticas de las ciencias de la complejidad y se propone llenar parcialmente este vacío. Se argumenta que dichas consecuencias incluyen a las políticas públicas que incumben sobre todo a la política en sentido amplio. Tres ejes articulan el argumento: *a*) una presentación de las ciencias de la complejidad y sus derivaciones; *b*) la consideración de las escuelas políticas de la complejidad, y *c*) las interrelaciones entre revoluciones científicas y revoluciones políticas.

**Palabras clave:** ciencias de la complejidad, epistemología, filosofía de las ciencias sociales, sociedad civil, Estado

## Abstract

There has been an increasing research and investigation about complexity worldwide. Nevertheless, none of them has explicitly considered the political implications of studying complex, not linear, phenomena. This work explores some of the most important political consequences of Complexity Science and intends to partially fill this gap. It is argued that those consequences include public policies, which mainly consider politics in a broad and strong sense. The argument has three major points: *a*) a presentation of Complexity Science and its derivations; *b*) the consideration of political consequences of complexity; and *c*) the interrelationship between scientific and political revolutions.

**Key words:** Complexity Science, Epistemology, Philosophy of the Social Sciences, civil society, State



**IZTAPALAPA**

*Agua sobre lajas*

\* Universidad del Rosario,  
Colombia  
carlos.maldonado@urosario.  
edu.co

Quiero agradecer a dos evaluadores anónimos que contribuyeron, de manera significativa, a hacer más comprensible este texto. Sus aportes, críticas y sugerencias enriquecieron mi propia comprensión del tema.

FECHA DE RECEPCIÓN 05/09/12, FECHA DE ACEPTACIÓN 06/03/13

IZTAPALAPA REVISTA DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES

NÚM. 74 • AÑO 34 • ENERO-JUNIO DE 2013 • PP. 189-208

## Introducción

La ciencia es *también* un fenómeno político. No sólo es el objeto de (grandes y pequeñas) decisiones de orden eminentemente político en el sentido más amplio e incluyente de la palabra. La actividad científica tiene, además, claras implicaciones políticas –directas e indirectas, de corto, mediano y largo alcance.

Por supuesto, la comunidad académica y científica no desconoce estos aspectos. Desde hace tiempo el tema ha sido objeto de aproximaciones distintas gracias a las directrices de la ciencia y la tecnología, las discusiones sobre investigación y desarrollo, la sociología de la ciencia, los estudios de ciencia, tecnología y sociedad (CTS), las reflexiones éticas sobre la investigación, la historia y la filosofía de la ciencia, en fin, la psicología del descubrimiento científico, para mencionar algunos de los principales referentes y contextos de estudio (Aróstica Lugones *et al.*, 2012).

De hecho, toda la historia de la tecnología fue, hasta hace muy poco, la historia de la tecnología con fines militares: seguridad y defensa. Así es desde la invención de la rueda hasta el control del fuego; del hacha y las flechas hasta el desarrollo de internet, por ejemplo. Pero no por ello es inevitable que la historia de la tecnología siga por ese camino.

Existen múltiples textos, de diversas calidades, acerca de las relaciones entre complejidad y política.<sup>1</sup> Sin embargo, como sucede con los nuevos campos de conocimiento, es más la palabrería que el contenido, algo que, por lo demás, es común también a las relaciones entre administración (o gestión, pública o privada) y complejidad: es decir, existe una bibliografía creciente pero la gran mayoría es terminología incomprensible y reflexión de muy baja calidad respecto de la complejidad (Maldonado y Gómez, 2011a).

<sup>1</sup> En inglés, cf. Alberts y Czerwinski, 1997; Jervis, 1998; Richards, 2000; Sanders y McCabe, 2003; Heartney, 2004; Boin *et al.*, 2005; Harrison, 2006; Geyer y Rihani, 2010; Boulton, 2011; y en español: Sotolongo y Delgado, 2006; Morin, 2009; y en un marco más amplio de reflexión sobre la epistemología de las ciencias sociales, Arnold y Robles, 2000.

Los textos existentes se ocupan en esencia de política –*politics* o *policies*– (de manera señalada, estudios de caso) con alguna referencia a la complejidad, pero entendida más como adjetivo o adverbio. El único trabajo que considera las consecuencias políticas de la complejidad en el sentido de lo que políticamente cabe derivar de las ciencias de la complejidad es el de Boulton (2011), con una dificultad: que confunde la política (*politics*) con las políticas públicas (*policy, policies*) –lo que de por sí ya es un grave problema que, empero, debe quedar aquí de lado– y, por consiguiente, se limita a las políticas públicas que, como es sabido, son políticas de Estado o de gobierno, a partir de la formulación de planes y programas de desarrollo (según cada país). Importantes como son, desde ningún punto de vista cabe reducir la política en sentido amplio a las políticas públicas.

La necesidad de este trabajo se funda en dos factores: primero, en el reconocimiento de que la política sí atraviesa a las *policies* pero se proyecta y comprende principalmente a la *politics*. Una forma más amplia de expresar esto es que la *politics* en general incluye los temas y problemas relativos al Estado y al gobierno (*policies*), pero se concentra sobre todo en políticas sociales, culturales, medioambientales, entre otras. En términos jurídicos, se trata de la discusión entre los bienes públicos y privados, y entre ambos y los bienes comunes. Por lo demás, para los griegos, un razonamiento análogo a las diferencias entre *policies* y *politics* es la distinción entre *politeia* y *politiké*. El segundo factor obedece al reconocimiento de que las ciencias de la complejidad ponen de manifiesto un crecimiento significativo en la vida académica y científica (evidenciado en el cada vez mayor número de artículos, libros y eventos alrededor del mundo) y que, no obstante, las implicaciones políticas de las ciencias de la complejidad no se han colocado en el foco de la discusión.

Dadas las limitaciones de espacio y de tiempo, con este texto me propongo estudiar las que considero las más notables consecuencias políticas de las ciencias de la complejidad, un campo cruzado, interdisciplinario y vital de trabajo e investigación. La literatura especializada no cuenta con reflexiones detalladas acerca de este tema, aun cuando sí ha sido manifiesta la conciencia de diversos planos acerca de la relevancia y el significado de las ciencias de la complejidad para el desarrollo de varias áreas y problemas particulares.

En primer lugar, mediante una breve presentación y caracterización de las ciencias de la complejidad, mostraré que desde el origen de éstas el tema ha estado presente. En segundo lugar, con base en las más trascendentes categorías o atributos de los sistemas y fenómenos complejos, extraigo ciertas consecuencias políticas de la complejidad. Después contrasto las repercusiones políticas de la complejidad y el estado tanto de la ciencia normal (Kuhn) como de la política en sentido normal. Al final introduzco algunas conclusiones.

## Las ciencias de la complejidad: origen y derivaciones

Desde el punto de vista administrativo-organizacional, las ciencias de la complejidad nacen con los primeros centros e institutos de investigación creados específicamente para el estudio de las dinámicas no lineales. Los primeros institutos y centros fueron: el Center for Studies of Nonlinear Dynamics, en el Instituto La Jolla, creado en 1978; el Santa Cruz Institute for Nonlinear Science, que se formó a partir del Santa Cruz Chaos Collective a comienzos de los años ochenta; el Center for Nonlinear Studies, en el Laboratorio Nacional de los Álamos, instituido en 1980; el Institute for Nonlinear Science, en la Universidad de California en San Diego, fundado en 1981, y el Santa Fe Institute, que inició operaciones en 1984 (Scott, 2007). Posteriormente se han creado varios centros alrededor del mundo. Con seguridad puede decirse que no existe ninguna universidad de prestigio mundial que no tenga un centro o instituto dedicado al estudio de la complejidad.

Ahora bien, desde la perspectiva teórica o conceptual, las ciencias de la complejidad pueden rastrearse, sin ninguna dificultad, hasta los trabajos pioneros de Gödel, Turing, Poincaré y, por lo menos en su espíritu, hasta el desarrollo del cálculo infinitesimal por parte de Leibniz y Newton. Entre los autores más destacados se encuentran científicos, filósofos, artistas y académicos que tienen una particularidad bien definida, a saber: la capacidad para interactuar horizontalmente y trabajar con equipos inter-, trans- y multidisciplinarios, y el esfuerzo por superar “las dos culturas”: las ciencias y las humanidades.

Sin duda, la computadora desempeñó un papel protagónico en el surgimiento de las ciencias de la complejidad. Pero no sólo la computación se encuentra en la base de la complejidad sino que ésta ha contribuido activamente al desarrollo de métodos y modelos de modelamiento y simulación (Maldonado y Gómez, 2011b).

En efecto, y en relación con la importancia social, cultural y política que entrañan los estudios sobre complejidad, el físico H. Pagels ya señalaba en los años ochenta:<sup>2</sup>

Estoy convencido de que las naciones y pueblos que dominen las nuevas ciencias de la complejidad serán las superpotencias económicas, culturales y políticas del siglo que viene [1991: 17].

<sup>2</sup> El libro se publicó en inglés en 1988.

Y más adelante, de manera aún más explícita:

Estoy convencido de que las sociedades que dominen las nuevas ciencias de la complejidad y puedan convertir ese conocimiento en productos nuevos y formas de organización social se convertirán en las superpotencias culturales, económicas y militares del próximo siglo. Aunque hay grandes esperanzas de que así se desarrollen las cosas, existe también el terrible peligro de que esta nueva proyección del conocimiento agrave las diferencias entre quienes los poseen y quienes no [1991: 54].

Pues bien, el estudio de los sistemas complejos se distingue por una serie de rasgos que, sin dificultad alguna, permiten sostener que son un tipo de revolución –científica, tecnológica y cultural– en la línea de los trabajos de Th. Kuhn. Así, se trata de un grupo de ciencias críticas respecto del determinismo y del reduccionismo de la ciencia clásica; es decir, de la idea de que el origen de un fenómeno y la línea de tiempo que conduce hasta el presente determinan su futuro. Y también de la noción de que la complejidad de un fenómeno puede ser explicada y comprendida en términos agregativos o analíticos, identificando, ulteriormente, los componentes últimos constitutivos del fenómeno, a fin de reconstruir desde ellos la historia o la “complejidad” del caso.

En consecuencia, las ciencias de la complejidad adquieren un carácter eminentemente cruzado, inter-, trans- y multidisciplinar, fundadas a partir de *problemas de frontera*, es decir, de aquellos que interesan no únicamente a una ciencia o disciplina, sino en los que convergen o coinciden tradiciones disciplinares distintas, métodos y metodologías diferentes, lenguajes y habilidades plurales con el afán de formularlos y resolverlos.

Quisiera decirlo en términos más precisos y fuertes: mientras que la ciencia clásica y normal se caracteriza(ba) por tener objeto, campo y áreas de trabajo, la ciencia de punta (*spearhead science* y *large-scale research*) se define a partir de problemas. Con más exactitud: las ciencias de la complejidad *no* tienen objeto: poseen problemas de trabajo plurales. Y de todos, los más significativos son: ¿qué es (la) complejidad?, ¿por qué las cosas son o se hacen complejas? En el esfuerzo por resolver estos interrogantes emergieron las ciencias de la complejidad.<sup>3</sup>

Las observaciones de Pagels se derivan estrictamente del corpus lógico, metodológico, epistemológico y conceptual de las ciencias de la complejidad. Se

<sup>3</sup> Éste es el primer rasgo fuerte de contraste entre las ciencias de la complejidad, el pensamiento complejo y los enfoques sistémicos, una distinción que aquí debe quedar de lado.

trata, por primera vez en la historia, de un grupo de ciencias que se dan a la tarea de estudiar aquellos temas, retos, problemas y comportamientos que la ciencia clásica –e incluso la filosofía– no quisieron estudiar o no pudieron aceptar o explicar. Se trata del devenir (“física del devenir”) (Prigogine, 1980), las turbulencias e inestabilidades, los cambios súbitos, imprevistos e irreversibles (teoría del caos) (Thom, 1997; Zeeman, 1978), la impredecibilidad (caos) (Lorenz, 2000; Ruelle, 1995), las sorpresas y la no causalidad (emergencia) (Holland, 1998), las adaptaciones y el aprendizaje (Holland, 1995; de la vasta obra de Gould remito a 1994), las sinergias y los bucles de retroalimentación positivos y negativos (Hofstadter, 1989; Arthur, 1994), la autoorganización (Kauffman, 1995, 2000), las cascadas de errores (Barabási, 2003), las sincronías en el tiempo y en el espacio (Strogatz, 2003), entre otros fenómenos y comportamientos.

Dicho a modo de contraste, las ciencias de la complejidad no se ocupan de fenómenos causales ni multicausales, de explicaciones en términos de promedios o estándares, matrices o vectores, distribuciones normales o estadística en cualquier sentido. Manifiestamente, las ciencias de la complejidad se sitúan en la antípoda, por así decirlo, de los paradigmas de la ciencia clásica (Casti, 1989).

Como se puede apreciar, una(s) ciencia(s) que estudie(n) estos fenómenos tiene(n) clara(s) ventaja(s) frente a la ciencia que simplifica, estandariza y reduce la complejidad a elementos fundamentales, y que constantemente parametriza la no linealidad. En complejidad no existe lo fundamental, y la última vez que, con voz alta, la ciencia normal hablará en esos términos será con Ashby, a propósito de la teoría de los procesos fundamentales, una expresión a la que no es ajena Feymann.

Las explicaciones de estas características o atributos de la complejidad son suficientemente conocidas por la comunidad de complejólogos y caotólogos, y la literatura al respecto es amplia y sólida. Se hace necesario, más bien, dirigir la mirada a lo que estas propiedades de los sistemas complejos no lineales implican desde el punto de vista político y para la política en general.

En fin, desde numerosas perspectivas, el estudio, la comprensión y el eventual aprovechamiento de situaciones marcadas por turbulencias, inestabilidades, cambios súbitos e imprevisibles, cascadas de errores, atractores extraños, procesos autoorganizativos y demás pueden tener numerosas ventajas que no escapan a una mirada reflexiva. Tal es exactamente el significado de las ciencias de la complejidad: su significado teórico, pero al mismo tiempo práctico.

## Consecuencias políticas de la complejidad

El tema aquí no es el de las ciencias sociales –por ejemplo su estatuto epistemológico, su naturaleza y articulaciones–, tampoco es el de la adscripción de la política al conjunto de las ciencias sociales, y menos aún el de la eventual contribución al panorama de las ciencias sociales por parte de los investigadores latinoamericanos. Por el contrario, el foco de interés se concentra en las consecuencias políticas de la complejidad, sin pretender ser prolijo acerca de las mismas.<sup>4</sup> Sin embargo, sí quiero de manera puntual y precisa destacar las que, en este contexto, parecen ser las consecuencias políticas más explícitas y dramáticas de las ciencias de la complejidad.

De entrada cabe distinguir dos posibilidades en cuanto a las consecuencias políticas de las ciencias de la complejidad: ya sea la implementación en política de las ideas derivadas de las ciencias de la complejidad, o el empleo de estas ciencias para analizar la política. Quisiera aquí, sobre todo por razones de espacio, concentrarme en el primer aspecto. Sólo que el plano en el que permanece este trabajo es estrictamente conceptual. Por consiguiente, quedan de lado cuestiones relativas a: sistema político, régimen político, gobierno y Estado, política y relaciones internacionales y otros semejantes y próximos. El foco de interés atañe de modo expreso a la teoría política o a la filosofía política.

De entrada, el rasgo más fuerte de las interrelaciones entre política y complejidad tiene que ver con el reconocimiento de la no linealidad. Consiste en el hecho de que, en contraste con la historia política de la humanidad, vivimos en un mundo diferente de suma cero, en el cual la política sucede entre más de tres cuerpos; es decir, la política del mundo contemporáneo es del tipo *n-body problem*. En el lenguaje de las relaciones internacionales (*international affairs*) es lo que habitualmente se conoce como multilateralismo. Los problemas no lineales implican trabajar con *n* número de soluciones/agentes/espacios que definen a un sistema de complejidad creciente.

En efecto, en la historia de la humanidad –que puede expresarse como la historia de un mundo de suma cero– la política fue maniquea, binaria y dualista.

<sup>4</sup> Éste constituye el objeto de un libro en el que me encuentro trabajando como resultado de una investigación que realicé en la Facultad de Ciencia Política y Gobierno de la Universidad del Rosario (Bogotá). Algunos avances de esta investigación han sido presentados en el doctorado en Estudios Políticos, Universidad Nacional de Colombia (2010), el doctorado en Derecho, Universidad del Rosario (Bogotá) (2011), y en la Red Andaluza de Investigación para la Paz y los Derechos Humanos (Raipad), de la Universidad de Granada (España) (2012). Este artículo es un avance de la investigación.

Y supuso, asimismo, la idea de que existen jerarquías rígidas y centralidad de las acciones y las decisiones. No sin ambages, el concepto *subterráneo* más importante de la historia occidental es el de enemigo. “Quien no está conmigo está contra mí”, una expresión que se remonta a Santiago en *El libro de los libros*. La lógica formal clásica sirve adecuadamente para expresar esta clase de sistemas y situaciones, pues es una lógica bivalente: 1 o 0, y jamás 1 y 0.

En un mundo diferente de suma cero, los problemas se refuerzan, de manera positiva y negativa, en bucles cuyo vector final no es predecible. Mejor aún, esta clase de problemas demandan múltiples actores con problemas magníficos de coordinación, sincronización y estructuras multiniveles y en red. La ciencia de redes complejas puede hacer aquí magníficas contribuciones (Barrat, Barthélemy y Vespignani, 2008). En particular, se trata de atender si las redes existentes son libres de escala, si obedecen a distribuciones de leyes de potencia y si existe o no sincronización espacial (Watts, 2003; Barabási, 2003) o temporal (Strogatz, 2003) y estallidos súbitos (Barabási, 2010) que dan lugar a complejas situaciones emergentes.

En contextos en los que nuevos actores, nuevas tecnologías (redes sociales) y nuevas acciones emergen –y que se expresan, por ejemplo, en el movimiento Indignados, la primavera árabe con todos sus matices, *Occupy Wall Street*, el movimiento de estudiantes en Chile, por mencionar algunos–, las formas de autoorganización cobran mayor trascendencia. Pues bien, en relación con contextos semejantes, quiero sostener aquí la tesis según la cual lo que emerge en estas condiciones es, por un lado, *liderazgo sin líderes* y, por otro, *estrategia sin estrategias*. Claramente, lo mejor de la teoría, la filosofía y los estudios políticos clásicos y normales sobre la política poco y nada puede decir al respecto. Sin dificultad alguna, la complejidad tiene toda la palabra: son estructuras, dinámicas y comportamientos análogos a los que constituyen el objeto de trabajo de la inteligencia de enjambre (*swarm intelligence*): es decir, la inteligencia que exhiben colectivos como los cardúmenes, las manadas ecuestres, las abejas, las hormigas y las termitas, incluso los comportamientos estudiados en dinámicas de criticalidad autoorganizada y que tienen expresiones cotidianas en la cultura y la sociedad (Fisher, 2009) y dan lugar a importantes consideraciones de orden político.

El tema que aparece en la epidermis de los estudios sobre el mundo actual se denomina “gestión del riesgo”, “sociedad del riesgo”, “gestión de la(s) crisis” (Gilpin y Murphy, 2008). Es el estudio y la toma de decisión de situaciones caracterizadas por turbulencias, fluctuaciones e inestabilidades crecientes y *no planificables* (o *planeables*). En otras palabras, el problema de base es el del manejo de situaciones en las que la estrategia, en el sentido tradicional de la expresión, “hace



agua". La política y la economía, las finanzas y los sistemas militares, los procesos sociales y los fenómenos naturales constituyen claros ejemplos para quienes están bien informados acerca de los avatares del mundo de hoy. Las ciencias de la complejidad son ciencias de sorpresas, no en el sentido que suponen de entrada –como en el caso de los griegos–: el asombro ( $\theta\alpha\upsilon\mu\alpha\zeta\epsilon\iota\nu$ ) como condición para la reflexión y la vida, sino, mejor aún, la sorpresa como tema mismo de trabajo.

Así, mientras la noción de equilibrio –cuya contraparte es el concepto matemático de *simetría*– caracteriza, más o menos, la mayor parte de la historia de Occidente, a partir de la termodinámica del no equilibrio hemos logrado ver y entender, por primera vez, los comportamientos, sistemas y fenómenos de equilibrio como casos particulares de dinámicas más amplias y determinantes para el orden de lo real, a saber: los sistemas *alejados del equilibrio*. De esta suerte, el aprovechamiento de la complejidad no consiste en (re)conducir los sistemas alejados del equilibrio (nuevamente) al equilibrio, sino, por el contrario, entender que en situaciones alejadas del equilibrio o *en el filo del caos* nuevas estructuras y dimensiones emergen. En términos más radicales, la gestión política –gobierno en el más amplio de los sentidos– consiste en conducir las estructuras y organizaciones lejos del equilibrio, que es donde cobran autonomía, capacidad de decisión propia, donde la libertad es la regla (antes que y por encima de la norma, aunque no sin ella); los individuos pueden tomar las decisiones sobre su vida en sus propias manos, que en ello al fin y al cabo consiste la democracia, la libertad y la autonomía; por lo menos desde el punto de vista filosófico.

El concepto de emergencia produce un desplazamiento fundamental respecto del concepto más importante de toda la historia de la humanidad occidental: el concepto de causa-causalidad ( $\alpha\iota\tau\iota\alpha$ ,  $\iota$ ). En verdad, la causalidad *sólo* sirve: a) en escalas locales, b) bajo condiciones controladas. Es decir, los fenómenos y sistemas complejos *no* son controlados y no se explican ni suceden *a escala local*. El concepto de emergencia es entonces acuñado o empleado para entender y trabajar con esta clase de dinámicas y comportamientos. Esto es, aquellas situaciones que no se pueden explicar ni a partir de lo anterior ni tampoco de lo inferior, sino como evolución, aprendizaje y adaptación.

Los fenómenos, procesos y comportamientos caracterizados por complejidad creciente carecen de control, y los esquemas de explicación enfocados en el control –jerárquico y centralizado– son ineficientes para explicar las dinámicas no lineales. En los trabajos sobre ciencias de la complejidad –en especial en las áreas de ingeniería, física y filosofía de la tecnología– el estudio (¡crítico!) de los sistemas de control poco a poco ha dirigido la mirada hacia otras formas de control:

el paralelo, el difuso y el distribuido. Las ciencias sociales y humanas poco o nada se han acercado a estos conceptos que tienen magníficas implicaciones en el estudio de los sistemas sociales humanos. Con el tiempo, la atención se ha encauzado hacia los sistemas y fenómenos carentes de control; es decir, en los que el control, literalmente, sucede en cada caso en función del caso. Esta expresión exige precisarse.

Existen –¡muchos!– sistemas carentes de control (central, rígido, jerárquico o jerarquizado). El más inmediato es el cuerpo humano. En efecto, el cuerpo humano es un sistema de sistemas y, en contra de la tradición aristotélica, no es cierto que el cerebro sea el sistema (u órgano o incluso glándula) esencial. El cuerpo humano se compone de numerosos sistemas: el nervioso central, el inmunológico, el linfático, el digestivo, el cardiovascular, el muscular, el sanguíneo. El centro depende en cada caso de cada caso; así, por ejemplo, cuando se estudia, el centro lo ocupa el sistema nervioso central en cuanto atención, concentración, memoria, asociación, etcétera. Pero si después del estudio se hace ejercicio el centro se desplaza al sistema muscular. Y si luego se almuerza o se cena, el centro se mueve, a su vez, al sistema digestivo. Y así de manera sucesiva. Quizás el único sistema que nunca descansa y que en verdad es determinante para la salud y la vida del organismo es el inmunológico, que es, en sentido literal, ubicuo: no se encuentra localizado en un único espacio como los demás sistemas del organismo. No en vano ha sido descrito con justeza como un “cerebro” móvil dentro del organismo.

Con seguridad, pensar, actuar y vivir en términos de sistemas no centralizados, jerárquicos ni rígidos tiene profundas implicaciones políticas frente a las cuales el régimen, el sistema político y en general el *establishment* (para recuperar un concepto de los años sesenta) no está preparado.

Otro caso conspicuo de un sistema en el que no existe control es la naturaleza; en ella no hay control, y con certeza no en los términos de la tradición occidental. Por esta razón cuesta tanto entender su lógica: debido a los atavismos de los sistemas piramidales de la civilización de Occidente, que no son otra cosa que la antropologización e incluso la antropomorfización de la naturaleza. En verdad, la naturaleza opera en sistemas en paralelo, distribuidos, difusos, por adaptación y aprendizaje permanente, y por sistemas de cooperación antes que de competencia (Nowak y Highfield, 2011). En la física hace tiempo que los conceptos de “ley” y de “constante(s)” han quedado atrás.

Una de las ideas más radicales de la complejidad es que la realidad, el mundo, la naturaleza o la sociedad no tienen una *única* lógica. Por el contrario, lo real y lo posible admiten múltiples lógicas. Así, el pluralismo lógico afirma que *no* existe

una *única* verdad lógica (*there is no one true logic*), una idea que resulta molesta para los círculos más conservadores u ortodoxos de la política, la religión y ciertos grupos sociales y de poder. En general, la marca de familia, por así decirlo, de la complejidad es el pluralismo (Mitchell, 2004), la diversidad (Page, 2011), la multiplicidad –irreductibles, por definición.

De acuerdo con Maldonado (2013), las lógicas no clásicas son ciencias de la complejidad, e incluyen, entre otras, a las lógicas modal y multimodal, la difusa, las polivalentes, la epistémica, la del tiempo, la cuántica, la de la relevancia, la paraconsistente, la de contrafácticos, la libre y la lógica de fibras (*fibring logic*).

La idea de que haya más de un sistema de verdad no implica, sin embargo, que cualquier verdad dé lo mismo. En complejidad no es cierta, por tanto, la derivación de un relativismo lógico –ni, por lo demás, de cualquier otro tipo–. Ésta es, sin duda, la idea más fuerte que se sigue, directa, inmediata y necesariamente, de las lógicas no clásicas, pero no es la única, sólo que frente al monismo de verdad, que se traduce como lógicas de la exclusión y posterior de la violencia (García Gutiérrez, 2007), el reconocimiento de lógicas polivalentes (hasta infinitos valores de verdad), de verdades incompletas y circunscritas (no absolutas), por ejemplo, resulta molesta o escandalosa para la tradición y el presente normales de la cultura y el poder.

Existe una idea filosófica en el núcleo de la complejidad que no cabe obliterar. Se trata de la idea, el concepto, el problema –según se prefiera– del *devenir*. En efecto, si “la historia oficial” (para citar una película argentina de 1985, de Luis Puenzo) de Occidente gira alrededor de la idea del “ser”, las ciencias de la complejidad en general, y la termodinámica del no equilibrio en particular, reclaman de manera abierta y, por primera vez, la relevancia del devenir.

El “ser” es el concepto axial de toda la historia occidental, formulada por Parménides de Elea, Meliso de Samos y Zenón de Elea, y proyectada sobre el telón de toda la civilización durante cerca de 2 500 años por Platón y Aristóteles: “Nada entra al ser que no sea el ser, y nada sale del ser que no sea el ser”, “El ser es, y el no-ser no es. Si el no ser fuera (posible) no se podría pensar, y si se pudiera pensar no se podría decir” (Gorgias). Lo subsiguiente es historia conocida. La traducción política de la idea de ser implica una defensa (casi siempre a ultranza) del statu quo, de la institucionalidad, en fin, del poder y de la historia habidas. En cualquier caso, el rechazo de la posibilidad que es, por definición, lo “otro” del “ser”.

En este sentido, Heráclito nunca formó parte del guion principal en la historia de Occidente, ni siquiera como actor de reparto ni como antagonista, si

cabe la expresión. Ni siquiera en el marxismo, en especial cuando el joven Marx escribe su tesis sobre Demócrito y Epicuro (el marxismo posterior jamás habría de recuperar o de tomar en serio esa tesis).

Cuando la idea del “ser” es traducida al poder implica la aceptación rasa del realismo político (*Realpolitik*). Expresiones populares de este realismo político son las referencias a la *pax romana* y la *pax americana*. Pensar algo distinto del ser equivale, en política, simple y llanamente, a la oposición, a los movimientos alternativos y a la revolución, principios inaceptables para la buena conciencia política.

En contraste con la física del ser, Prigogine escribe en 1980 *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*, en el que, de manera explícita, afirma una *física del devenir*. Y, por consiguiente, el reconocimiento de que el tiempo es el factor que hace complejos a los fenómenos y la realidad. Esta idea no significa, empero, que la realidad sea transitoria y pasajera; por el contrario, se trata del reconocimiento de que la realidad (estable, fija, permanente, inamovible) es incompatible con la vida misma, que es el fenómeno de máxima complejidad conocida en el universo. Así, las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida en cuanto que la vida es, *par excellence*, el fenómeno de complejidad creciente en el universo. De aquí puede derivarse la idea de una *política de vida* –en contraste con cualquier *política de poder*.

La derivación más relevante de la defensa de la institucionalidad, de la democracia, de los valores y principios imperantes no siempre se traduce, aquí o allá, en la defensa, gratificación, exaltación, posibilitamiento y dignificación de la vida. Al contrario, una política de vida en el sentido mencionado sí puede, entonces, ser llamada democrática, pero en un sentido subsidiario.

## Complejidad: revolución científica y revolución política

El motivo extracientífico que dio origen al nacimiento del caos, conceptualmente una de las primeras ciencias de la complejidad, surge de una cuestión política. Como es sabido, en 1889 el rey Óscar II de Suecia, aficionado a temas científicos, ofreció un cuantioso premio a quien respondiera si el universo es estable a largo plazo. Por razones de espacio, dejaré aquí de lado el contexto y los antecedentes científicos del problema, que nos remiten sin dificultad a la mecánica clásica newtoniana y, con ella, a la ley de la gravitación universal, para enfocarme en otro aspecto.

Las monarquías han sido siempre hereditarias. De suerte que la posibilidad de que el universo sea estable a largo plazo conlleva, *implicitamente* por lo menos, la posibilidad de que su propio linaje –el de Óscar II– pueda seguir al frente de los destinos de Suecia. Así pues, la pregunta tenía, *además*, una clara preocupación política.

Los mejores matemáticos de la época (Weierstrass, Dedekind, Poincaré, Kronecker, Hilbert y otros más) se dieron a la tarea de responder el interrogante, pero sólo Poincaré obtendría la respuesta. La maravilla es que la suya fue una contestación por *imposibilidad*. Poincaré simplificó el problema del universo a un modelo más elemental: el problema de los tres cuerpos (el Sol, la Tierra y la Luna, que se conocerá en lo sucesivo como *the 3-Body Problem*) (Valtonen y Karttunen, 2006), de acuerdo con el cual la más mínima inestabilidad en cualquiera de ellos afectará a los otros dos y al conjunto de relaciones entre los tres. La más mínima inestabilidad significa: los tres cuerpos son inestables y se encuentran en el filo del caos. El problema se torna magníficamente más complicado cuando se amplía a más de tres, a cuatro, ocho, 20 y más cuerpos. Es justamente lo que se conocerá como *The N-Body Problem* (Meyer, 2000). Como ya se sabía hace tiempo, el universo está compuesto por un sinnúmero de cuerpos.

Los cimientos de la ciencia del caos estaban sentados, pero haría falta el desarrollo de la informática para que, décadas más tarde, en 1962, Lorenz, en el contexto de la meteorología, hiciera explícito que a largo plazo pequeñas perturbaciones tienen efectos inmensos. Así, la ciencia habrá de descubrir la impredecibilidad a mediano y largo plazos. O, dicho inversamente, que los fenómenos y la realidad son predecibles tan sólo a corto plazo.

Las ciencias de la complejidad entrañan o, mejor todavía, *son* una revolución –científica, conceptual, tecnológica, en fin: cultural y social.

La idea de revoluciones científicas se popularizó gracias a Kuhn, pero él tan sólo expresa de forma sucinta una idea cuyos mejores antecedentes son A. Koyré, G. Canguilhem y G. Bachelard, como observa agudamente F. Varela (en el segundo prólogo a Maturana y Varela, 2004).

Es decir, el conocimiento avanza no mediante acumulaciones, progresiva y linealmente, sino, de hecho, por vía de quiebres, rupturas y discontinuidades. Así, la historia de la educación, de la ciencia y la filosofía, por ejemplo, no sucede como si supiéramos más de lo anterior, lo que ocurre es que sabemos distinto acerca de otras cosas.

Se han dado revoluciones científicas que pueden y deben ser tomadas con seriedad en toda la extensión de la palabra. Por analogía, de acuerdo con Kuhn, las revoluciones políticas se entienden a la manera de las revoluciones científicas, y las revoluciones son modos de progreso (Kuhn, 1982: capítulos XI y XII).

Hay que decir que la idea de revoluciones en la ciencia –y por consiguiente, en la cultura y la sociedad– había sido trabajada antes de Kuhn (cf. Hall, 1954; Hayek, 1955), contemporáneamente con Kuhn (Bernal, 1967) y después de Kuhn (Hall, 1983; Cohen, 1988; Serres, 1991 –que la explica en términos de *bifurcaciones*–; Gribbin, 2005). Esta lista, desde luego, no pretende ser exhaustiva.

Como quiera que sea, una revolución científica no es únicamente un nuevo paradigma; esto es, una nueva teoría o comprensión o explicación del mundo.<sup>5</sup> Una revolución científica consiste en una serie de fenómenos y procesos que se destacan por los siguientes rasgos:

- ♦ *Organización social de la ciencia.* La propia comunidad académica y científica se organiza de forma distinta que en situaciones de ciencia normal. Así, si el paradigma de la ciencia normal fueron las academias (Royal Academy of Sciences, Académie Française des Sciences, Preussische Akademie der Wissenschaften, esto es, la organización disciplinar y cerrada de la ciencia), las revoluciones científicas conllevan, en particular en el contexto de las ciencias de la complejidad, el surgimiento de nuevas asociaciones (coloquios, seminarios, congresos, etcétera) y nuevos modos de expresión (revistas, editoriales, colecciones). La ciencia interactúa de nuevas maneras con la filosofía y el arte, y se quiebran o disminuyen las barreras entre los tres.
- ♦ *Lenguaje.* Emergen en la ciencia nuevos conceptos y términos, nuevos tropos<sup>6</sup> que permiten ver mejor nuevos fenómenos. Al mismo tiempo, viejos conceptos *normales* se revelan *ad hoc*. En la historia de la ciencia es lo que sucede a propósito de conceptos como *flogisto*, *homúnculos*, *espíritus animales*, *éter* y otros. Hay incluso ciencias y disciplinas que desaparecen.
- ♦ *Nuevos métodos.* En contraste con las dos formas clásicas de ciencia –por inducción y por deducción–, aparece una dúplice nueva modalidad, un nuevo método científico y, por consiguiente, una nueva ciencia: ciencia por modelamiento y simulación (Axelrod, 1997; Maldonado y Gómez, 2010).<sup>7</sup> Con los nuevos métodos emergen también, por tanto, nuevas técnicas y tecnologías. Las ciencias de la complejidad no son ciencias por inducción ni tampoco por deducción, sino por modelamiento o simulación.

<sup>5</sup> Éste es el sentido preciso que el término tiene en Kuhn. En efecto, a pesar de que Kuhn acuña el concepto, este autor debate en numerosos pasajes el significado de “nuevos paradigmas” –en contraste con la ciencia normal, un concepto que ya en vida de Kuhn se había vuelto muy popular–. Finalmente, Kuhn (1982) precisa –ampliando– el concepto mismo de revolución científica.

<sup>6</sup> No única y simplemente metáforas.

<sup>7</sup> Dejo de lado la justificación de esta tercera clase de ciencia, que es bastante conocida entre la comunidad de complejólogos en especial, pues ése sería el objeto de otro artículo, dada la novedad. Remito sobre este punto a una parte de la bibliografía.

- ♦ *Organización social del conocimiento.* Con las revoluciones científicas no sólo el conocimiento se organiza de otras formas sino, mejor y más radicalmente, la propia sociedad se organiza de nuevas maneras. El conjunto de estudios de ciencia, tecnología y sociedad es un buen ejemplo; pero también puede mencionarse la creación de nuevos currículos, carreras de estudio y niveles de posgrados en la vida académica, y nuevas formas de socialización y de participación de la sociedad en las dinámicas del conocimiento. Por derivación, la sociedad se organiza de otro modo en correspondencia con los recientes conocimientos alcanzados.
- ♦ *Tipos de acción del conocimiento.* En complejidad, la exigencia de entrada es la capacidad para lograr la interlocución y trabajar de manera cruzada con otras ciencias y disciplinas, pero también con la filosofía y el arte. Las fronteras clásicas en el conocimiento desaparecen o, por lo menos, se hacen móviles y permeables. La vieja discusión de la epistemología de los años cincuenta y sesenta, esto es: qué es “ciencia”, qué es “disciplina”, que es “práctica” o “saber”, se desdibuja en el contexto de complejidad. Lo determinante son los problemas de frontera y las acciones que se siguen del reconocimiento de este tipo de problemas. Se producen refuerzos positivos entre nuevos conocimientos, tecnologías, actores y formas de acción individual y social.

## Conclusiones

Desde el punto de vista administrativo-organizativo las ciencias de la complejidad nacen en los años ochenta, pero las consecuencias políticas no dependerán necesariamente de estos centros e institutos. Y, sin duda, las repercusiones que aquí nos interesan no pueden tampoco, en la acepción más fuerte de revolución científica, seguirse de estos u otros centros académicos y de investigación. Las revoluciones científicas *son* –pero no mecánicamente– revoluciones sociales y políticas.

He presentado algunos de los atributos más significativos de la complejidad. Las consecuencias políticas de estas ideas consisten en su “implementación” política: en el tipo de acción que se sigue de ellas y, por ende, en su radicalidad. Como se infiere, las consecuencias políticas son las de una revolución –científica, por decir lo menos–. Sólo que, y esto debe quedar claro, no es una revolución a la manera de las que la han precedido en la historia de la humanidad. Justamente, el pasado no determina ya, en los sistemas de complejidad creciente, su futuro y sus posibilidades: las consecuencias, a pesar de las observaciones iniciales de Pagels, no son previsible.

La implementación política de las ideas de la complejidad tiene –puede tener– repercusiones de gran impacto, pero no es un asunto que dependa directamente de la comunidad académica y científica. Antes bien, la *apropiación social* del conocimiento es un tema al cual los académicos y científicos no son indiferentes.

Las ciencias de la complejidad pueden ser comprendidas en sentido filosófico como *an-arché* (αν-αρχή); esto es, como ausencia de un principio constitutivo último fundamental de la realidad, la sociedad o la naturaleza. La idea de una *arché* (αρχή) fue la idea fundacional de Occidente y condujo a la postulación del “ser” como idea fundamental. La *ausencia de principio o fundamento* –¡por definición único!– es, si cabe la expresión, el *motto* de la complejidad. Nos encontramos aquí con la derivación de su distanciamiento, por decirlo de alguna manera, respecto del *ser* en favor del *devenir*. No sólo vivimos en un universo no ergódico (irrepetible), también es probabilístico y cargado de incertidumbre (principio de la física cuántica). No hay poder que dure para siempre, y la complejidad es la vida misma.

## Bibliografía

- Alberts, David S. y Thomas J. Czerwinski (eds.)  
 1997 *Complexity, Global Politics, and National Security*, National Defense University, Washington, D.C.
- Arnold, Marcelo y Fernando Robles  
 2000 “Explorando caminos transilustrados más allá del neopositivismo. Epistemologías para el siglo XXI”, en *Cinta de Moebio*, núm. 7, marzo, pp. 49-66.
- Aróstica Lugones, Yanara et al.  
 2012 “Los resultados de una investigación de las ciencias sociales: una cuestión de la ciencia y la tecnología”, en *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, febrero <<http://www.eumed.net/rev/cccss/18/llrg.html>>.
- Arthur, Brian  
 1994 *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*, The University of Michigan Press, Michigan.
- Axelrod, Robert  
 1997 *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton University Press (Princeton Studies in Complexity), Princeton.
- Barabási, Albert-László  
 2003 *Linked. How Everything is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*, Plume, Nueva York.



- 2010 *Bursts. The Hidden Patterns Behind Everything We Do, from your E-mail to Bloody Crusades*, Plume, Nueva York.
- Barrat, Alain, Marc Barthélemy y Alessandro Vespignani  
2008 *Dynamical Processes on Complex Networks*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bernal, John Desmond  
1967 *Historia social de la ciencia*, ts. I y II, Península, Barcelona.
- Biagioli, Mario  
2012 "From Ciphers to Confidentiality: Secrecy, Openness and Priority in Science", en *The British Journal for the History of Science*, vol. 45, núm. 2, junio, pp. 213-233 <<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8608496>>.
- Boin, Arjen *et al.*  
2005 *The Politics of Crisis Management: Public Leadership under Pressure*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Boulton, Jean  
2011 "Complexity Theory and Implications for Policy Development", en *Emergence: Complexity and Organisation*, vol. 12, núm. 2, pp. 31-40.
- Casti, John  
1989 *Paradigms Lost. Tackling the Unanswered Mysteries of Modern Science*, Avon Books, Nueva York.
- Cohen, Bernard  
1988 *Revolución en la ciencia*, Gedisa, Barcelona.
- Fisher, Len  
2009 *The Perfect Swarm. The Science of Complexity in Everyday Life*, Basic Books, Nueva York.
- García Gutiérrez, Antonio  
2007 *Desclasificados. Pluralismo lógico y violencia de la clasificación*, Anthropos, Barcelona.
- Geyer, Robert y Samir Rihani  
2010 *Complexity and Public Policy. A New Approach to 21st Century Politics, Policy, and Society*, Routledge, Londres.
- Gilpin, Dawn R. y Priscilla J. Murphy  
2008 *Crisis Management in a Complex World*, Oxford University Press, Oxford.
- Gould, Stephen Jay  
1994 *Ocho cerditos. Reflexiones sobre historia natural*, Crítica, Barcelona.
- Gribbin, John  
2005 *Historia de la ciencia. 1543-2001*, Crítica, Barcelona.

- Hall, Alfred Rupert  
 1954 *The Scientific Revolution. 1500-1800. The Formation of the Modern Scientific Attitude*, The Beacon Press, Boston.  
 1983 *The Revolution in Science. 1500-1750*, Longman, Londres y Nueva York.
- Halvorson, Hans  
 2012 "What Scientific Theories Could Not Be", en *Philosophy of Science*, vol. 79, núm. 2, abril, pp. 183-206.
- Harrison, Neil E. (ed.)  
 2006 *Complexity in World Politics. Concepts and Methods of a New Paradigm*, State University of New York Press (Sunny Series in Global Politics), Nueva York.
- Hayek, Friedrich August  
 1955 *The Counter-Revolution of Science. Studies on the Abuse of Reason*, The Free Press of Glencoe, Londres.
- Heartney, Eleanor  
 2004 *Defending Complexity: Art, Politics, and the New World Order*, Hard Press Editions, Stockbridge.
- Hofstadter, Douglas  
 1989 *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid*, Vintage Books, Nueva York.
- Holland, John Henry  
 1995 *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*, Addison-Wesley, Reading.  
 1998 *Emergence. From Chaos to Order*, Addison-Wesley, Reading.
- Jervis, Robert  
 1998 *System Effects: Complexity in Politics and Social Life*, Princeton University Press, Princeton.
- Kauffman, Stuart  
 1995 *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization, and Complexity*, Oxford University Press, Oxford.  
 2000 *Investigations*, Oxford University Press, Oxford.
- Klein, Julie Thompson  
 2004 "Interdisciplinarity and Complexity: An Evolving Relationship", en *Emergence: Complexity and Organisation*, vol. 6, núms. 1-2 (núm. especial), pp. 2-10.
- Kuhn, Thomas  
 1982 *La tensión esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Lorenz, Edward N.  
 2000 *La esencia del caos*, Debate, Madrid.
- Maldonado, Carlos Eduardo  
 2013 "Pensar la complejidad con la ayuda de las lógicas no-clásicas", en Leonardo

- Rodríguez (coord.), *La emergencia de los enfoques de la complejidad en América Latina*, Buenos Aires, pp. 46-60.
- Maldonado, Carlos Eduardo y Nelson Gómez
- 2010 *Modelamiento y simulación de sistemas complejos*, Centro de Estudios Empresariales para la Perdurabilidad-Facultad de Administración-Universidad del Rosario (Documento de Investigación, 66), Bogotá, febrero <[http://www.carlosmaldonado.org/articulos/DI66\\_Admon\\_\\_Modelamiento\\_web.pdf](http://www.carlosmaldonado.org/articulos/DI66_Admon__Modelamiento_web.pdf)> [7 de abril de 2012].
- 2011a *El mundo de las ciencias de la complejidad*, Universidad del Rosario, Bogotá.
- 2011b "Biological Computation: A Road to Complex Engineered Systems", en Hiroki Sayama et al. (eds.), *Unifying Themes in Complex Systems. Volume VIII: Proceedings of the Eighth International Conference on Complex Systems*, New England Complex Systems Institute Series on Complexity (NECSI) Knowledge Press, Nueva Inglaterra, pp. 918-927 <<http://necsi.edu/events/iccs2011/proceedings.html>> [7 de abril de 2012].
- Maturana, Humberto y Francisco Varela
- 2004 *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo*, Lumen, Santiago de Chile.
- Meyer, Kenneth R.
- 2000 *Periodic Solutions of the N-Body Problem*, Springer Verlag, Berlín.
- Mitchell, Sandra
- 2004 "Why Integrative Pluralism?", en *Emergence: Complexity and Organisation*, vol. 6, núms. 1-2 (núm. especial), pp. 81-91.
- Morin, Edgar
- 2009 *Para una política de la civilización*, Paidós, Barcelona.
- Nowak, Martin A. y Roger Highfield
- 2011 *Super Cooperators. Altruism, Evolution, and Why We Need Each Other to Succeed*, Free Press, Nueva York.
- Page, Scott E.
- 2011 *Diversity and Complexity*, Princeton University Press, Princeton/Oxford.
- Pagels, Heinz
- 1991 *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*, Paidós, Barcelona.
- Prigogine, Ilya
- 1980 *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*, W. H. Freeman, San Francisco.
- Richards, Diana (ed.)
- 2000 *Political Complexity: Nonlinear Models of Politics*, The University of Michigan Press, Michigan.

- Ruelle, David  
1995 *Azar y caos*, Alianza, Madrid.
- Sanders, T. Irene y Judith A. McCabe  
2003 *The Use of Complexity Science. A Survey of Federal Departments and Agencies, Private Foundations, Universities, and Independent Education and Research Centers*, Washington Center for Complexity and Public Policy, Washington, D. C.
- Scott, Alwyn C.  
2007 *The Nonlinear Universe. Chaos, Emergence, Life*, Springer Verlag, Berlín/Heidelberg.
- Serres, Michel (ed.)  
1991 *Historia de las ciencias*, Cátedra, Madrid.
- Sotolongo, Pedro y Carlos Delgado  
2006 *La revolución contemporánea del saber y la complejidad social*, Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales, Buenos Aires.
- Stengers, Isabelle  
2004 "The Challenge of Complexity: Unfolding the Ethics of Science. In Memoriam Ilya Prigogine", en *Emergence: Complexity and Organisation*, vol. 6, núms. 1-2 (núm. especial), pp. 92-99.
- Strogatz, Steven  
2003 *Sync. How Order Emerges from Chaos in the Universe, Nature, and Daily Life*, Theia, Nueva York.
- Thom, René  
1997 *Estabilidad estructural y morfogénesis. Ensayo de una teoría general de los modelos*, Gedisa, Barcelona.
- Valtonen, Mauri y Hannu Karttunen  
2006 *The Three-Body Problem*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Watts, Duncan J.  
2003 *Six Degrees. The Science of A Connected Age*, W. W. Norton & Company, Nueva York/Londres.
- Zeeman, Erik Christopher  
1978 *Catastrophe Theory. Selected Papers 1972-1977*, Addison-Wesley, Reading.
- Zwirn, Hervé P.  
2006 *Les systèmes complexes. Mathématiques et biologie*, Odile Jacob, París.