

BIOCOMPLEJIDAD: Facetas y tendencias

Moisés Villegas Ivey • Lorena Caballero Coronado • Eduardo Vizcaya Xilotl
(editores)

Octavio Miramontes Vidal ◊ Gustavo Martínez-Mekler ◊ Germinal Cocho Gil
(Prólogo)

Alfredo Marcos • Alberto Lifshitz • Alexandre de Pomposo • Tom Froese • Michael D.
Kirchhoff • Oswald Basurto • Moisés Villegas • Agustín Mercado Reyes • Benjamín
Domínguez • Erik L. Mateos • José J. Reyes • Hermes Ilarraza • Dolores Rius • Rafael
Chávez • Lilia Rodríguez • Aquiles C. Ilarraza • Octavio Valadez • Enrique
Hernández-Lemus • Mario Siqueiros-García • Carlos E. Maldonado

CopIt-arXives
Publishing Open Access
with an Open Mind
2019

Este libro contiene material protegido por leyes de autor

Todos los derechos reservados © 2019

Publicado electrónicamente en México, por CopIt-arXives.

Diseño de portada: Manolo Cocho Ursini.

Biocomplejidad: facetas y tendencias / editores Moisés Villegas Ivey, Lorena Caballero Coronado, Eduardo Vizcaya Xilotl; [autores] Alfredo Marcos ... [y diecinueve más]. — México CDMX: CopIt-arXives, 2019
Incluye bibliografías e índice
ISBN: 978-1-938128-21-9 ebook

Derechos y permisos

Todo el contenido de este libro es propiedad intelectual de sus autores quienes, sin embargo, otorgan permiso al lector para copiar, distribuir e imprimir sus textos libremente, siempre y cuando se cumpla con lo siguiente: (i) el material no debe ser modificado ni alterado, (ii) la fuente debe ser citada siempre y los derechos intelectuales deben ser atribuidos a sus respectivos autores, (iii) estrictamente prohibido su uso con fines comerciales.

El contenido y puntos de vista planteados en cada capítulo es responsabilidad exclusiva de los autores y no corresponden necesariamente a los de los editores o a los de ninguna institución, incluidas CopIt-arXives o la UNAM.

Producido con software libre incluyendo \LaTeX . Indexado en el catálogo de publicaciones electrónicas de la UNAM y en Google Books.

Todas las figuras e imágenes son cortesía de www.wikimedia.org o bien de los autores, a menos que se señale lo contrario explícitamente.

Los editores agradecen el apoyo de DGAPA-UNAM a través del proyecto PAPIIT IN-107619.

ISBN: 978-1-938128-21-9 ebook

<http://scifunam.fisica.unam.mx/mir/copit/>

Este libro ha pasado por revisión de pares

CopIt-arXives

Cd. de México - Cuernavaca - Madrid - Curitiba
Viçosa - Washington DC - London - Oxford

Con el apoyo de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Instituto de Física

ÍNDICE

PRÓLOGO	V
INTRODUCCIÓN	IX
BIOCOMPLEJIDAD	
<i>Alfredo Marcos</i>	1
1. Introducción	1
2. Complejidad y organización	3
3. Organización y función	7
4. Función y sustancia	9
5. Conclusión	11
Bibliografía	12
BIOCOMPLEJIDAD DE LA ENFERMEDAD HUMANA	
<i>Alberto Lifshitz</i>	15
Generalidades	15
Las causas	16
La fisiopatología	17
La comorbilidad	17
La enfermedad crónica	18
El pronóstico	18
Los tratamientos y la polifarmacia	18
El organismo humano como un todo	19
Influencia de la subjetividad	19
Prevención, anticipación, previsión	19
El caso de la diabetes	20
Individuación del diagnóstico	21
¿En dónde está el defecto?	21
¿Prediabetes: condición de riesgo o etapa temprana de la enfermedad?	22
Diabetes y salud reproductiva	23
Problema de todos	23
Epílogo	23

Bibliografía	24
TOPOLOGÍA MÉDICA: LA LÓGICA DE LAS FORMAS VITALES	
<i>Alexandre S.F. de Pomposo</i>	25
Introducción	25
Las ideas de las formas y las formas de las ideas	26
Las escalas de la realidad	27
Topología molecular	28
La arquitectura futurista de las células	30
Las texturas de los tejidos	33
La organización de las funciones	35
La geometría del caos	39
Bibliografía	42
FISIOPATOLOGÍA, ENFERMEDADES COMPLEJAS Y CÁNCER	
<i>Moisés Villegas</i>	45
Complejidad, problema e intuición. Complejidad como explicación	47
Homeostasis y enfermedad	48
Enfermedades complejas	49
Una nueva fisiopatología	52
Cáncer y los procesos de desarrollo	54
Conclusiones	55
Bibliografía	55
EMOCIONES, ESTRÉS Y SALUD. DESDE EL PARADIGMA LINEAL AL DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS	
<i>Benjamín Domínguez, Erik Leonardo Mateos, José Javier Reyes</i>	57
Introducción	57
Estrés y salud	59
Una nueva visión obtenida por la experiencia de investigación clínica psicológica en México	59
Análisis no lineal de la variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC)	64
Conclusiones	66
Bibliografía	67
COMPLEXUS CORDIS: SALUD Y PATOLOGÍA CARDIOVASCULAR	
<i>Hermes Ilarraza, María Dolores Rius, Rafael Chávez, Lilia Rodríguez, Aquiles C. Ilarraza</i>	71
Introducción	71
El corazón a través de la historia	71
El corazón de la Antigüedad y la Edad Media	72

El corazón y el Renacimiento	74
El método científico estudia al corazón	75
Nacimiento de la homeostasis	75
Los sistemas abiertos, no lineales y complejos	76
‘De humani corporis fabrica’ a la fractalidad:	
la forma del corazón y sus vasos	80
Generalidades anatómicas	81
La banda ventricular y el nuevo concepto del movimiento del corazón	84
Sistema de vasos sanguíneos	86
Fractalidad en la disposición de los vasos sanguíneos	88
Ultraestructura del corazón: los miocardiocitos	92
Potencial de acción transmembrana	94
Sistema miocárdico de conducción eléctrica	96
Inervación del corazón	98
La fisiología cardiovascular	99
Homeostasis: estabilidad fuera del equilibrio	99
El ciclo cardíaco	99
Variabilidad de la frecuencia cardíaca	101
Hemodinámica	106
Auto-organización de la TA	109
Ciclos circadianos	110
Determinantes de la salud y factores de riesgo cardiovascular	110
Causalidad	110
Factores de riesgo	112
La patología cardiovascular	114
Cardiopatía isquémica	114
Insuficiencia cardíaca	116
Fibrilación atrial y ventricular	116
Otras patologías	118
Cardiopatías congénitas	118
El diagnóstico cardiovascular	119
El tratamiento de las patologías cardiovasculares	119
Acciones para evitar la muerte súbita de origen cardíaco	121
Evaluación del riesgo de enfermar del corazón	122
Limitaciones de las ciencias de la complejidad	122
Conclusión	123
Bibliografía	123
LA COMPLEJIDAD TERMODINÁMICA DE LA MATERIA VIVA	
<i>Enrique Hernández-Lemus, Mario Siqueiros-García</i>	131
Introducción: Entendiendo la vida desde la física térmica	131
Los orígenes conceptuales de la relación vida-energía	133
Termodinámica fuera del equilibrio	138

Irreversibilidad y simetría	138
Fenomenología	139
Procesos irreversibles y compensación	140
Los espacios de estados y la clasificación termodinámica	143
Termodinámica irreversible lineal	145
Termodinámicas extendidas	148
Termodinámica racional	149
Variables internas	150
El formalismo de la función de compensación	154
Los orígenes: el trabajo de Clausius	155
Forma local de la función de compensación	156
Forma de Gibbs generalizada ($T d\Psi$)	158
La complejidad energética y entrópica de la vida	159
Complejidad y regulación de los flujos celulares	159
Señalización biológica y procesos de transporte	160
Conclusiones	164
Bibliografía	165

DONDE HAY VIDA, HAY MENTE: EN APOYO A UNA TESIS FUERTE DE LA CONTINUIDAD VIDA-MENTE

<i>Michael D. Kirchhoff, Tom Froese</i>	171
1. Introducción	172
2. El principio de energía libre (PEL)	175
2.1. La energía libre y la predicción cognitivista de minimización del error	176
2.2. Minimización no cognitivista de la energía libre	177
3. Del PEL cognitivista a la discontinuidad vida-mente	178
3.1. Conceptos de computación	178
3.2. Conceptos de información: hacia una consideración semántica de la computación	180
3.3. Problemas de integración	182
3.4. Problemas de significado	182
4. De la minimización de energía libre a una perspectiva vida-mente demasiado generosa	185
La ergodicidad y la manta de Markov	185
5. Restringiendo el PEL no-cognitivista con la REC: una consideración de la mente evolutiva y tardía	188
6. De la REC al EA y el PEL no-cognitivista: una fuerte continuidad vida-mente	193
7. Conclusiones	195
Agradecimientos	196
Referencias	196

¿CÓMO ACTUAR EN CASO DE EMERGENCIA? GEOINGENIERÍA Y COMPLEJIDAD	
DAD	
<i>Agustín Mercado-Reyes</i>	199
Bibliografía	218
¿EXISTE EL ORGANISMO INDIVIDUAL? LA SIMBIOSIS Y LA EMERGENCIA DE NUEVOS INDIVIDUOS	
<i>Oswalth Basurto</i>	221
Líquenes	224
Micorrizas y la rizosfera	226
Las relaciones simbióticas entre termitas	228
El microbioma humano	231
El individuo como holobionte:	
su construcción a través de la sintrofia	233
A manera de conclusión	234
Bibliografía	236
BIOCOMPLEJIDAD: EL DESAFÍO TRANSDISCIPLINARIO DE LAS NATURALEZAS-CULTURAS	
<i>Octavio Valadez-Blanco</i>	239
Introducción	239
De la biocomplejidad del objeto	
a la biocomplejidad de los sujetos	241
La biocomplejidad epistémica, ontológica y tecnológica	242
La biocomplejidad: entre la crítica a la razón moderna	
y la emergencia de modelos no idealizados	245
a) Complejidad en sentido amplio	246
b) Complejidad como ciencias de la complejidad	247
c) La biocomplejidad: desafío empírico e histórico	248
La biocomplejidad como crítica	
y horizonte de transformación	250
a) Ciencias de la biocomplejidad:	
de la curiosidad al compromiso académico	251
b) De lo singular a lo genérico: la biocomplejidad	
como contenido de la transdisciplina	253
La biocomplejidad y la transdisciplina:	
responsabilidad, crítica y alternativas	
contra la crisis planetaria	254
Bibliografía	255
LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD SON CIENCIAS DE LA VIDA	
<i>Carlos Eduardo Maldonado</i>	259
Introducción	259

1. El origen y la filosofía de las ciencias de la complejidad: un contraste	260
2. Qué son y qué hacen los sistemas vivos	264
3. La vida, un evento raro	268
4. ¿En qué sentido puede decirse que las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida?	271
5. Conclusiones	275
Bibliografía	277

LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD SON CIENCIAS DE LA VIDA

Carlos Eduardo Maldonado*

INTRODUCCIÓN

Las ciencias de la complejidad constituyen un fenómeno apasionante, reciente y creciente de investigación. No cabe decir, en manera alguna, que la ciencia de punta son las ciencias de la complejidad; pero sí puede afirmarse sin recatos que lo mejor de la ciencia de punta (*spearhead science*) sí pasa por las ciencias de la complejidad. Dicho de manera puntual, se trata de ese grupo de ciencias, disciplinas, métodos, lenguajes, enfoques y metodologías que tienen en común el rechazo del reduccionismo y del determinismo, el recelo de la ciencia de tipo lineal, en fin, el reconocimiento de la no linealidad. De manera fuerte y precisa, se trata del estudio no simple y llanamente de fenómenos, sistemas y comportamientos complejos, sino, mucho mejor, caracterizados por complejidad *creciente*.

El origen de las ciencias de la complejidad ha sido presentado en varias oportunidades (Waldrop, 1993; Lewin, 1994; Gleick, 2008). Hoy es ya un lugar común el reconocimiento de que se ocupan de fenómenos, sistemas y comportamientos caracterizados por propiedades y atributos tales como: fluctuaciones, turbulencias, inestabilidades, no linealidad, emergencia, auto-organización, sinergias, percolación, redes libres de escala, y varios más (Barabási, 2003; Barrat, Barthélemy & Vespignani, 2008). Este reconocimiento fue el resultado de las primeras contribuciones al estudio de la complejidad, provenientes principalmente de la física, la química, las matemáticas, las ciencias de la computación y la biología.

Muy pronto, alrededor del año 2000, aproximadamente, se hizo evidente sin embargo, que desde cualquier punto de vista los sistemas de mayor complejidad son los sistemas sociales (Scott, 2007; Mitchell, 2009; Byrne & Callaghan, 2014), *latu sensu*; esto es, los sistemas sociales naturales, los sistemas sociales artificiales y los sistemas sociales humanos. A la fecha, el grueso del trabajo e investigación en complejidad son los sistemas sociales; pero, al mismo tiempo, los retos y desafíos se han vuelto mayores.

No obstante lo anterior, con este texto me propongo defender una tesis, a saber: las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida (aunque lo contrario no pueda

* Profesor titular, Facultad de Medicina, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia. / maldonadocarlos@unbosque.edu.co

afirmarse necesariamente). En efecto, desde casi cualquier punto de vista razonable, el fenómeno de máxima complejidad posible son los sistemas vivos –la vida. Así, la tesis enunciada quiere significar que las ciencias de la complejidad tienen por objeto, esto es, por finalidad, comprender la vida, explicarla, y, por tanto, por derivación, afirmarla, hacerla posible de tantas maneras como quepa imaginar.

Como se hace evidente, consiguientemente, en las ciencias de la complejidad no hay una carga más teórica que práctica (o al revés), y ambas se implican recíproca y necesariamente. Los imperativos de este grupo de ciencias son tanto científicos como éticos. Este rasgo es algo que difícilmente puede decirse del panorama científico en general en el mundo –en las que aún predominan las discusiones y los énfasis teóricos y los prácticos o éticos, los filosóficos o los científicos, o también, los explicativos y comprensivos y los de aplicación y experimentación. En el curso de este texto iré mostrando las dos cargas en zig-zag.

En cualquier caso, intuitiva, conceptual, categorial, imaginativa, heurísticamente, la vida es el fenómeno de máxima complejidad conocida, o de máxima complejidad posible. La vida tal y como la conocemos, y la vida-tal-y-como-podría-ser posible. Este última distinción se encuentra en el núcleo mismo de las investigaciones en el que se cruzan la biología y la ecología, las ciencias de la computación, las ciencias sociales y humanas y la vida artificial.

La tesis enunciada se soporta en cuatro argumentos, así: en primer lugar, se elabora un contraste entre los orígenes de las ciencias de la complejidad y la heurística o la filosofía de las mismas. Este contraste ha pasado obliterado usualmente en la bibliografía. Sobre esta base, el segundo argumento afirma que es indispensable una comprensión básica de la vida o de los sistemas vivos, y esta comprensión consiste en el hecho de que no existe absolutamente ningún componente material o hylético que permita distinguir la vida de la no-vida. El tercer argumento sostiene que el estudio de la vida y de los sistemas vivos tiene un grado al mismo tiempo de generalidad y de singularidad que todos los otros fenómenos –físicos y demás– carecen. Se hace, naturalmente, la justificación de este argumento. Finalmente, el cuarto argumento afirma que ciencias de la complejidad son ciencias de la vida pero lo contrario no puede afirmarse de la misma manera. Al final se extraen algunas conclusiones.

1. EL ORIGEN Y LA FILOSOFÍA DE LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD: UN CONTRASTE

Las ciencias de la complejidad nacen a partir del grupo de ciencias más prestigiosas, con mayores desarrollos sólidos y presupuesto: la física, la biología, la química, las ciencias de la computación y las matemáticas. Esto ha sido reconocido ya por diversos autores (Pagels, 1991). En este sentido, durante mucho tiempo, incluso hasta la fecha, el lenguaje de las ciencias de la complejidad ha sido marcadamente fisicalista, o biológico, o matemático y demás. Conceptos, aproximaciones, enfoques tales como transiciones de fase de primer orden y de segundo orden, redes

catalíticas y autocatalíticas, distinción entre una máquina de Turing (TM, por su sigla en inglés) y otros tipos de máquinas (o-TM, U-TM, y otras), percolación, grafos e hipergrafos, redes libres de escala y leyes de potencia, por ejemplo, son algunos ejemplos conspicuos y bien conocidos del lenguaje que permea y hace posible los estudios sobre los fenómenos de complejidad creciente (Strogatz, 2003; Watts, 2004). La lista se puede ampliar a voluntad sin ninguna dificultad.

Esta característica tiene dos retos enormes: de un lado, da la impresión de que existiría un cierto cientificismo entre los estudiosos e investigadores de la complejidad. Otros aspectos, dimensiones y realidades como el arte, la literatura, la estética y la música, por ejemplo, quedarían por fuera del ámbito de las “ciencias de la complejidad”. Una crítica sobre este primer aspecto puede encontrarse en (Casti, 1998; Maldonado, 2016b).

Al mismo tiempo, de otra parte, esta impresión podría hacer pensar que cuando se dirige la mirada, por ejemplo, hacia las ciencias de la salud, las ciencias de la vida o las ciencias sociales y humanas, el mismo tipo de lenguaje, métodos, enfoques y explicaciones serían de uso obligatorio. Se olvida, de esta suerte, que la atmósfera de la complejidad, si cabe decirlo así, es la interdisciplinariedad; esto es, el cruce y retroalimentación recíproca de ciencias, enfoques, disciplinas y tradiciones diferentes pero que confluyen en el interés o la necesidad por comprender y explicar la complejidad.

A fin de evitar generalizaciones, quisiera aquí concentrarme en un caso particular. Se trata del caso, apasionante y muy reciente, del diálogo o las contribuciones entre historia y complejidad, un fenómeno que no ha sido atendido, para nada, por parte de los complejólogos de primera generación (Prigogine, Pines, Anderson, Arrow, Kauffmann, Gell-Mann, Holland, y muchos más).

La historia y la historiografía en sus relaciones con la complejidad ponen de manifiesto que pensar la historia consiste en pensar el cuadro amplio (*big picture*) de los acontecimientos y fenómenos de la historia, que no se reducen a los aspectos estrictamente históricos e historiográficos. La historia profunda (*deep history*), la gran historia (*big history*) y la historia total (*histoire totale*), son los tres ejes que definen el sentido de la historia en el sentido de la complejidad. Así, climatología y geología, genética y teoría de la evolución, cosmología y astrofísica confluyen con los campos habituales de la economía, la sociología, la historia y la filosofía. El lenguaje deja de ser el de un solo grupo de ciencias, para incorporar a diferentes familias de ciencias (Schryock and Lord Smail, 2011; Christian, 2005; Morris, 2016).

A pesar de lo anterior, está claro que la física, la química, la biología, las matemáticas, la biología y las ciencias de la computación han sentado ampliamente todas las bases y fundamentos –semánticos, metodológicos, heurísticos– para el estudio de la complejidad (Cowan, Pines & Meltzer, 1999). El cuadro 1 ofrece un panorama de los conceptos, métodos y características de los sistemas complejos.

Pues bien, podemos afirmar, sin ambages que el cuadro 1 condensa lo que podemos denominar el estado normal del estudio y trabajo en las ciencias de la complejidad. Dicho en términos más fuertes y directos, esta es la normalidad en com-

Ciencias o Disciplinas	Conceptos	Métodos	Heurística
Física	Transiciones de fase (de primero y de segundo orden) Fenómenos de percolación Concepto de información Efecto Zenón Comportamientos cuánticos	Física estadística	Búsqueda de elementos simples y leyes fundamentales
Química	Redes catalíticas y autocatalíticas Estructuras conservativas y estructuras disipativas		Estudio de redes catalíticas Recientemente, trabajo en escalas microscópicas (micro escalares)
Biología	Emergencia Autoorganización Jerarquías de complejidad Equilibrios puntuados Metabolismo y metabolización Aprendizaje y Adaptación	Evolución Genética Biología de sistemas Enfoque Evo-Devo, y Eco-Evo-Devo	Trabajo con base en largas series de tiempo, y también procesos (más) acelerados de evolución
Matemáticas	Mapas cuadráticos Redes complejas, Leyes de potencia Problemas P vs NP Grafos e hipergrafos	Diversos métodos analíticos (teorema KAM, constantes de Lyapunov, y muchos más)	Distinción entre matemáticas de sistemas continuos y matemáticas de sistemas discretos
Ciencias de la Computación	Lenguaje booleano Máquina(s) de Turing Arquitectura de Von Neumann Hypercomputación	Métodos y procedimientos algorítmicos	Sistemas bioinspirados Computación y sistemas vivos

Cuadro 1: El panorama de las ciencias de la complejidad *modo normal*. Nota: Existen varios conceptos y métodos que no son exclusivos de una sola ciencia o disciplina. Elaboración del autor.

plejidad.¹ Naturalmente, el cuadro 1 no pretende ser exhaustivo, pero sí mostrar una visión general o una tendencia en el estudio de la complejidad.

Tal es el caso que cuando se funda el que quizás es el más prestigioso o el más popular de los centros e institutos de complejidad, el Instituto Santa Fe (SFI), en Nuevo México, nace inmediatamente el programa de encontrar las leyes últimas constitutivas de la complejidad, y, al mismo tiempo, nace el propio concepto de “ciencias de la complejidad”. Es imposible trabajar hoy en día en complejidad sin pasar por el modelamiento y la simulación; y al mismo tiempo, en otro plano, es imposible trabajar complejidad, asimismo, sin atravesar por el estudio de la ciencia de grandes bases de datos (*Big-Data Science*).

Basta una mirada cuidadosa a lo mejor de la bibliografía sobre ciencias de la complejidad para verificar la validez de aquello a lo que apunta el cuadro 1. Pero lo mismo puede afirmarse sin dificultad para la mayoría de centros e institutos dedicados al estudio de la complejidad. No en última instancia, particularmente

¹ Como se aprecia, hay en el fondo un eco kuhniiano en la distinción entre ciencia normal y ciencia revolucionaria (o nuevos paradigmas). Hoy en día, gracias al crecimiento de la masa crítica en complejidad, ya existe algo así como una complejidad normal. Véase el tuit de xyz, Wikipedia, Handbooks, etc.

por parte de quienes se introducen apenas en las ciencias de la complejidad, se ha desarrollado una *jerga* propia. Es la jerga de la comunidad de los complejólogos, y de manera generalizada, esa jerga es predominantemente fisicalista, matemática o computacional.

Pues bien, quisiera decirlo de manera franca y directa: pareciera que existiera una tendencia fisicalista entre los complejólogos –cuya mejor expresión sería la afirmación según la cual en la base de la complejidad existen leyes simples; aun cuando jamás se ha llegado a explicitar dichas leyes–; o bien, pareciera que existiera un cientificismo que no permite superar el llamado crítico de C.P. Snow acerca de la dos culturas (2012); o acaso, incluso, a pesar del llamado de Brockman acerca de la emergencia de una “tercera cultura” (1991). Una asimetría entre artes y humanidades, de un lado, y ciencias, de otro, pareciera no haberse resuelto jamás, con la ayuda de las ciencias de la complejidad.

Como se aprecia sin dificultad, el origen de las ciencias de la complejidad marca su destino hasta hace muy poco tiempo, y muy ampliamente en la comunidad –que ya va siendo relativamente normal– de complejólogos. Sin embargo, la filosofía de las ciencias de la complejidad permanece, si cabe decirlo, en otro plano. Se trata del esfuerzo sincero y denodado por llevar a cabo síntesis –algo que, a decir verdad, no ha terminado de madurar completamente; la mayoría de trabajos en esta área siguen siendo minimalistas, técnicos, ampliamente aplicados y experimentales–. Han existido numerosos llamados a trabajar en la filosofía de las ciencias de la complejidad (Rescher, 1998; Mitchell, 2003), y este llamado consiste en aspectos como los siguientes:

- *Elaborar síntesis amplias, fuertes y móviles.* A nivel gráfico, el mapa de la complejidad elaborado por B. Castellani, y ampliamente conocido por los complejólogos.² La dificultad estriba en que a nivel teórico o conceptual un mapa semejante aún queda como un deseo o un indicador, sencillamente.
- *Establecer los principios (fundamentales) de la complejidad.* La dificultad estriba en que estos principios fueron entendidos como la búsqueda de las leyes últimas constitutivas de la complejidad que, se asumió siempre, deben ser elementales. Este llamado puede ser visto como el *leitmotiv* de la fundación del Instituto Santa Fe. Al cabo, esta búsqueda nunca logró su cometido, y con el tiempo, los investigadores vinculados en torno al SFI dejaron de hablar o de mencionar lo que podemos idóneamente llamar los principios de la complejidad.
- *A título metodológico, la complejidad se funda en la interdisciplinariedad.* Este rasgo es suficientemente conocido, y, sin embargo, se impone una observación puntual. Bien entendida, la interdisciplinariedad consiste en el trabajo entre grupos de familias de ciencias y disciplinas y no simplemente el trabajo al interior de una misma familia de disciplinas y ciencias. La verdadera

² Una versión, para el año 2018, puede ser la siguiente: <https://twitter.com/complexcase/status/950749146713133057>

interdisciplinariedad no es, por ejemplo con referencia a las ciencias de la salud, cuando un epidemiólogo trabaja con un clínico, un traumatólogo, un inmunólogo y una enfermera. Asimismo, tampoco existe interdisciplinariedad al interior de las ciencias sociales y humanas por el hecho de que trabajen mancomunadamente un historiador, un antropólogo, un filósofo, un economista y un politólogo, por ejemplo. Finalmente, a título ilustrativo, no hay interdisciplinariedad por el simple hecho de que trabajen en equipo un físico, un geólogo, una matemática, un biólogo y una experta en computación o un estadístico. La verdadera interdisciplinariedad es cruzada entre familias de ciencias.

Observemos, para concluir provisoriamente esta primera sección, que los sistemas vivos exhiben todas las características, globalmente, que todos los sistemas –físicos, químicos, biológico, y demás–, poseen. Pero, *adicionalmente*, los sistemas vivos poseen propiedades y atributos que los sistemas físicos, químicos y demás, *en cuanto tales*, no poseen. Quisiera mencionar un rasgo singular: notablemente, los sistemas vivos procesan información en términos no-algorítmicos. Volveré sobre esta idea a continuación.

2. QUÉ SON Y QUÉ HACEN LOS SISTEMAS VIVOS

La forma tradicional como los sistemas vivos han sido comprendidos o explicados es a partir de los componentes o estructuras de los mismos, generalmente físico-químicos. Dicho de manera puntual, el problema de base consiste en la “definición” de lo que es la vida. Así, la vida sería un atributo específico que podría ser traducido en términos de termodinámica, la capacidad de reproducción, el conjunto de funciones metabólicas, la capacidad de autonomía y otros caracteres, y también como la complementación de estos mismos atributos entre sí (Bedau and Cleland, 2010). Esta es, ampliamente, la dirección principal de trabajo en torno a la comprensión y explicación de lo que son los sistemas vivos. En esta dirección participan, con aportes propios, biólogos y médicos, científicos de la computación y filósofos, químicos y matemáticos, entre otros.

No obstante lo anterior, los sistemas vivos pueden ser comprendidos en otra dirección, así: los sistemas vivos son *lo que hacen*, no tanto aquello de lo cual están compuestos. Si esta idea es plausible, entonces la mirada debe dirigirse hacia el tipo de cosas que hacen los sistemas vivos y que otros fenómenos y sistemas *no* hacen –en el planeta, en el universo.

He defendido la idea según la cual los sistemas vivos procesan información, y la procesan de una manera que no es posible asimilar a ninguna clase de máquina o de sistemas en el universo. El procesamiento de información es, a decir verdad, una comprensión computacional de la vida. Ahora bien, esta idea exige dos precisiones puntuales. Más exactamente, los sistemas vivos procesan información de manera no-algorítmica (Maldonado & Gómez Cruz, 2015).

Computar significa sencillamente procesar información. Desde este punto de vista, computar no quiere decir, en manera alguna, así como analizar, pensar, co-

nocer o algo semejante. Puede decirse que la metáfora de nuestra época es la de la computación, como la manera más adecuada, a los tiempos que corren, para entender procesos, estructuras, dinámicas. No en última instancia, cabe recordar aquí una idea de base en biología: la función determina la estructura.

En efecto, el computador, o mejor, la computación sirve como metáfora o símbolo para la ciencia en general en nuestra época. Así, por ejemplo, se ha sostenido explícitamente que el universo es un gran computador (Lloyd, 2007; Hey & Pápay, 2014); son varias las fuentes que apuntan en esta misma dirección.³

De otra parte, al mismo tiempo, el procesamiento de la información puede ser adecuadamente entendido, gracias a la medicina o a la biología, como la metabolización. En este sentido, metabolizar significa transformar una cosa en otra. Exactamente en esta dirección, procesar información no significa simplemente leer el universo y el medio ambiente, sino, mucho mejor, leer el entorno y entonces, consiguientemente, transformarlo. La información misma consiste en el procesamiento de la misma, de tal suerte que no existe información antes del procesamiento, y tampoco después.

Pues bien, decir que los sistemas vivos procesan información significa que tanto leen e interpretan el medio ambiente como que transforman el medio ambiente al cual se adaptan. Sólo que este procesamiento de información no debe ser asimilado, en absoluto, a una máquina de Turing (Maldonado, 2017b). Dicho de manera clara y directa: los sistemas vivos no procesan números y funciones. Cuando el procesamiento de la información es idóneo, adecuado o bien efectuado, transforma a los sistemas vivos en más sistemas vivos. De lo contrario, pone a los sistemas vivos en peligro. Procesar información es para los sistemas vivos un asunto de vida o muerte.

En este sentido, se ha sostenido que el procesamiento de información por parte de los sistemas vivos puede ser llamado como *hipercomputación biológica*, justamente para designar que los sistemas vivos procesan información de forma no lineal, en paralelo, en multinivel, de manera distribuida, y en términos de no-localidad. Nada semejante a una máquina de Turing, en ningún sentido.

Los sistemas vivos se adaptan incesantemente al medioambiente y al mismo tiempo modifican el entorno al cual se adaptan. Esto es, los sistemas vivos viven en paisajes rugosos adaptativos (*rugged adaptive landscapes*), y lo que observamos en la naturaleza son procesos permanentemente inacabados de co-evolución. Mucho mejor, y más radicalmente, la vida en general puede ser vista como una vasta red o trama de cooperación, antes que de selección y competencia. Esta idea ha dado lugar a la teoría del origen cooperativo de la vida (Nowak, 2011; Wilson, 2012). El concepto que mejor sirve para explicar esta situación es el de *eusocialidad* (*eusociality*). La vida, en una palabra, es un vasto sistema de cooperación, mutualismo y comensalismo, antes que de selección y depredación. No en última instancia, los sistemas vivos son holobiontes.

³ Ver, por ejemplo: [Are we living in a computer simulation?](#), [Is the Universe a Simulation?](#) y [The Universe as a Computer](#).

Digámoslo en otras palabras, desde otra perspectiva. No existe absolutamente ningún componente material, ontológico o hylético (*hylé*, en griego), que permita distinguir la vida de la no-vida. Asimismo, no existe absolutamente ninguna línea demarcatoria fija, bien establecida, que permita separar la vida de la no-vida, o también, la vida del medio ambiente, o incluso, asimismo, los factores bióticos de los abióticos.

El alfabeto de la totalidad del universo conocido y por conocer ha sido plenamente identificado –hasta la fecha–. Se compone de 118 letras: es la tabla de elementos químicos. La diferencia entre un animal y una silla, entre una planta y un balón cualquiera, entre un ser humano y un esfero determinado, o también entre una bacteria cualquiera y un vidrio o ventana, es únicamente una diferencia de tres tipos: o bien de grados (o gradientes), cualitativa, o de organización. Un elemento, por ejemplo, tiene más molibdeno que el otro, uno tiene más einsteniano que otro, uno tiene más litio que otro, y así sucesivamente. O bien, inversamente, uno tiene menos potasio que otro, tiene menos francio que otro, en fin, menos sodio que otro.

En el lenguaje de la química, lo anterior puede decirse, igualmente, en el sentido de que en un caso existen enlaces débiles, en otro enlaces dobles, en otro más enlaces covalentes, y así sucesivamente, como es conocido. La química sienta las bases para el alfabeto del universo, del mundo, de la realidad. Las diferencias entre los elementos de la naturaleza y del mundo son solamente diferencias de organización, de grados o cualitativas: nunca materiales u ontológicas. Como se aprecia, se produce aquí una fuerte inflexión con respecto a toda la historia anterior y frente a las comprensiones estándar de la vida.

La idea del “metabolismo primero” (*metabolism first*) ha venido a arrojar luces sugestivas con respecto al conjunto de teorías acerca de los orígenes de la vida. La vida crea las condiciones de posibilidad para su aparición y emergencia: no existen condiciones iniciales antes de que aparezca la vida, y acaso, entonces, diferentes a la vida misma. Los sistemas vivos aparecen en el universo ya con ciertos grados de complejidad, y no a partir de elementos simples que agregativa o composicionalmente darían origen a la vida.

La complejidad aparece ya compleja, pero se va haciendo, posteriormente, de complejidad creciente. Este es el núcleo mismo del estudio de los sistemas complejos. Pensar en complejidad significa, en otras palabras, pensar en términos de síntesis, y no ya solamente de forma analítica y agregativa.

Como se comprende, los sistemas vivos pueden ser comprendidos, en contraste con toda la tradición, no simplemente a partir de los componentes que los estructuran, sino, mucho mejor, en términos de lo que hacen. Los componentes no son, finalmente, muy diferentes del resto del universo. La vida forma parte del universo mismo, pero se expresa como una cualidad diferente del mismo. Esta cualidad es precisamente el hecho de que los sistemas vivos transforman el entorno abiótico, la entropía, en más vida. Los sistemas vivos responden a un entorno que cada vez comprendemos mejor en sus inicios, pero es, definitivamente, un acontecimiento singular –no un fenómeno que se ajuste a leyes, que son, por definición, de carácter general.

Así, por ejemplo, los sistemas vivos modifican el CO₂ para permitir un balance de oxígeno conveniente que haga posible la vida misma. En términos básicos, las relaciones pueden plantearse en los siguientes términos. El Sol se caracteriza porque transforma fuerza gravitacional en energía electromagnética. Esa energía llega a Gaia, como fuente primera, y en Gaia las plantas transforman la energía electromagnética en energía química (Volk, 1998); es la fotosíntesis. A su vez, las plantas y los seres humanos transforman la energía química en energía cinética. Pues bien, de manera más amplia, los sistemas vivos transforman la energía cinética en energía potencial.

De esta suerte, no solamente la entropía del universo se reduce produciéndose así formas y sistemas complejos, sino, al mismo tiempo, los sistemas vivos transforman la entropía en condiciones para el sostenimiento y creación de nuevas formas de vida. Esta es la historia de la evolución.

En otras palabras, los sistemas vivos “degradan” la entropía del Sol, y ese proceso puede ser idóneamente comprendido como el proceso a través del cual los sistemas vivos procesan información: del universo, del Sol, del planeta mismo, de sí mismos, de sus entornos y sus relaciones, en fin, incluso, de sus propias posibilidades o potencialidades (Chaisson, 2000). Sólo que todo este proceso acontece de forma no-teleológica. Algo que ya quedara sólidamente establecido a partir de Darwin.

Esto significa que los sistemas vivos procesan la energía libre y la transforman sentando las condiciones de posibilidad de su propia existencia, pero todo ello tiene lugar de forma no finalista; la evolución es el proceso mediante el cual, precisamente a través de paisajes rugosos adaptativos, los sistemas vivos se van haciendo posibles a sí mismos *a cada paso*. La vida es un acontecimiento no-teleológico que sabe de sí misma y de su entorno, en cada momento. En otras palabras, los sistemas vivos son un “programa” incompresible –a la manera de Turing–, y más exactamente indecidible. Se trata de una magnífica aporía, los sistemas vivos son sistemas de complejidad creciente, intratables (en el sentido de problemas intratables), que, sin embargo, se hacen posibles a sí mismos, de manera incesante, indefinida. En esto consiste la complejidad.

Los procesos de metabolización, de reproducción, los procesos termodinámicos en toda la línea de la palabra, y el procesamiento de información son acontecimientos que definen a los sistemas vivos de manera radical, exactamente así: como *procesos*, y no como *estados*. La vida es lo que hace de sí misma y en la forma en que lo hace, modificando, incluso, hasta cierto punto, los componentes mismos de que está estructurada. La consecuencia filosófica es de una radicalidad sin igual: los sistemas vivos son un devenir (Heráclito), y no ser (Parménides). Es en y a través del devenir que, en algún momento, los sistemas vivos llegan a ser alguna forma o estructura o comportamiento determinados.

3. LA VIDA, UN EVENTO RARO

Las ciencias de la vida, la biología, pero también los sistemas sociales y humanos tratan de singularidades, de excepciones, no de fenómenos y acaeceres universales y necesarios; que es y fue la lectura tradicional en ciencia y en la cultura.

En efecto, la preeminencia –lógica, metodológica, heurística y semántica– del fisicalismo, hizo creer siempre que la ciencia se ocupaba de fenómenos universales, generales, y experimentalmente reproducibles.

Pues bien, es una característica propia de las ciencias de la complejidad *latu sensu*, reconocer que la contingencia, el azar o la casualidad forman parte inextricable del universo y de la realidad. Las cosas no existen y no suceden según leyes y siempre necesariamente. Adicionalmente, hay fenómenos que tienen lugar aleatoriamente y son emergentes; no suceden causalmente.

Mencionemos, de manera caprichosa algunos ejemplos: solamente una vez en la historia del universo emergió la vida en la forma en que la conocemos, hace alrededor de 4,500 millones años, y nunca antes o después hemos sabido que la vida haya aparecido de la forma en que tuvo lugar; una sola vez en la vida hubo una revolución como la 1789 o la de 1917 y nunca jamás ha vuelto a suceder una revolución semejante; una sola vez en la historia se descubrió un continente de la forma como tuvo lugar en 1492, y nunca antes ni después ha sucedido un acontecimiento semejante. Los ejemplos pueden multiplicarse a voluntad. Y precisamente porque fueron acontecimientos singulares e irrepetibles implican complejidad.

En la misma dirección, una sola vez, hasta donde sabemos, un universo se originó hace aproximadamente 14 mil millones de años de la forma como este universo (o en rigor: esta región del universo) nació, a partir del fenómeno de supersimetría, y ha tenido la evolución que conocemos hasta la fecha. Es un hecho reconocido abiertamente que se trata de una singularidad. En la misma dirección, el estudio de los cuerpos o fenómenos más simples del universo, los agujeros negros, arrojan luces maravillosas acerca de las singularidades que se encuentran en el centro de cada galaxia. El estudio de los agujeros negros constituye uno de los vértices de la cosmología y la astrofísica. Análogamente, en un plano diferente, la pasión que genera entre los matemáticos el estudio de la función zeta de Riemann muestra claramente que los números primos –los ladrillos de los números y del universo–, en realidad, constituyen singularidades cuyo patrón escapa aún a las mejores mentes de la humanidad.

La idea de base aquí es que el estudio de la complejidad consiste en el estudio de singularidades, excepciones, acontecimientos únicos e irrepetibles. Ahora bien, cuando existen grupos de fenómenos excepcionales hablamos entonces de patrones (*patterns*). Así, por ejemplo, el caos nace a partir de la meteorología, que es la ciencia que se ocupa de la predicción del tiempo, y que pone de manifiesto que el caos implica la impredecibilidad; más exactamente la impredecibilidad a mediano y a largo plazo (Lorenz, 2000; Ruelle, 1995). La mariposa de Lorenz significa exactamente eso: nadie se baña dos veces en el mismo río (Heráclito); esto es, pequeños cambios imperceptibles tienen consecuencias enormes e impredecibles de

tal suerte que ningún fenómeno hace dos veces la misma trayectoria. A su vez, la termodinámica del no-equilibrio establece que los sistemas complejos existen en el filo del caos o, lo que es equivalente, lejos del equilibrio. En fin, la historia y las características de las ciencias de la complejidad son conocidas y han sido narradas en varias oportunidades.

Pues bien, existe un concepto preciso para designar las singularidades, los acontecimientos contingentes, en fin, las excepciones. Se trata del concepto de eventos raros (Maldonado, 2016b). Los fenómenos, sistemas y comportamientos complejos son eventos raros, literalmente.

Un evento raro es aquel que, por ejemplo en términos de su traducción estadística, puede ser entendida como una cola larga, y que es el objeto de estudio de la teoría de la teoría del valor extremo. Aunque hay que decir que otras estrategias y alternativas existen para el estudio de los eventos raros, tales como las lógicas no-clásicas, la lógica de contrafácticos, el estudio de la contingencia en general, y claro, las ciencias de la complejidad.

El estudio de los sistemas vivos implica, si cabe decirlo así, el estudio de la climatología (Acot, 2005) –esto es, la ciencia de esos fenómenos esencialmente variables inestables que es el clima, un fenómeno de largo alcance que se cruza con la geología–, tanto como el estudio de la evolución y el desarrollo (enfoque *evo-devo*). Una manera puntual en que puede traducirse esta doble implicación es como el estudio de la epigenética (Jablonka & Lamb, 2004; Moore, 2015). Esta idea quiere simple y llanamente subrayar el reconocimiento expreso de que no hay dos cosas: naturaleza y cultura, sino una sola.

En ciencias de la salud, en general, el modelo imperante hasta la fecha ha sido la epidemiología, que sirve de base para los estudios y afirmaciones acerca de epidemias, pandemias, morbilidad y mortalidad.⁴ El modelo epidemiológico en general responde a criterios de tipo fisicalista y por tanto universalista. Como es sabido, varios movimientos se están produciendo que apuntan en otras direcciones. Así, por ejemplo, la medicina transpersonal, que puede ser entendida como el estudio del paciente en términos de su genómica, transcriptómica, glucómica y demás. De esta suerte, la biología de sistemas permite un estudio personalizado, individual, más integrado y singular en cada caso.

En términos humanos, cabe decir sensatamente que la diferencia en el universo la establece el individuo. Es indudable que la estadística en general, y más ampliamente la mecánica estadística ha hecho contribuciones importantes a la historia del conocimiento y de la investigación. Pero es igualmente cierto que cada vez más el énfasis se desplaza hacia el estudio de fenómenos particulares, singulares, digámoslo de manera puntual, excepcionales. Esta constituye, sin ninguna duda, la punta de la investigación en general en el mundo.

⁴ Al cabo, la medicina y las ciencias de la salud sólo han sabido de enfermedad, y nunca, plenamente, hasta la fecha, de salud. Una derivación de este trabajo consiste en el reconocimiento de que las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida, y entonces, traducido al lenguaje de la medicina y de las ciencias de la salud, se trata de una inflexión fundamental en la mirada: debemos poder pensar en salud, y no ya en enfermedad; ni siquiera, quisiera mencionarlo, de pasada, en el continuo salud-enfermedad. Pero este es el tema de otro texto que queda para otro momento y lugar.

El descubrimiento de los eventos raros constituye una ganancia en la historia de la ciencia en general, análoga al descubrimiento de la incertidumbre, a comienzos del siglo XX. No hemos perdido, en absoluto, las certezas y verdades que alguna vez ganamos o conquistamos. Lo que sucede es que, *adicionalmente*, hemos hecho el aprendizaje de la incertidumbre. Huelga decir que las incertidumbres son intrínsecas a la naturaleza, y no tiene, entonces, en absoluto, ninguna connotación psicológica, emocional o cognitiva.

De esta suerte, puede decirse que el vector general del conocimiento –esto es, de la historia de la ciencia, de la filosofía y de la cultura en general– consiste en el tránsito de lo general a lo particular; esto es, de estudios, intereses y enfoques centrados en procesos de generalización y universalización, hacia el reconocimiento de fenómenos, procesos y comportamientos singulares y particulares. Hasta llegar, explícitamente, al reconocimiento de los eventos raros.

La vida: un fenómeno raro, basado en un componente altamente frágil (el carbono), con raíces en un gas extraño en el universo y altamente explosivo (el oxígeno), cuya característica fundamental es la biodiversidad –esto es, el carácter irreplicable de las formas (morfología), en fin, un acontecimiento que se ha recuperado a sí mismo, contra todos los datos estadísticos, a lo largo de cinco extinciones masivas, varias de ellas de un valor altamente crítico.

Podemos afirmar sin ambages que lo que hace a la vida es el hecho de que siendo ella misma un fenómeno físico, no se agota ni se reduce a la física, y por el contrario, se define por su negación incesante de las leyes físicas –neguentropía (Schrödinger), estructuras disipativas (Prigogine)–. Los sistemas vivos resuelven problemas de altísima complejidad como si fueran elementales (plegamiento de proteínas, producción de antígenos, adaptación a medios inhóspitos).

Los extremófilos constituyen acaso el plano más desafiante de las leyes de la física. Es prácticamente imposible girar la mirada en el planeta y no encontrar vida; *à la limite*, lo mismo puede decirse casi del sistema solar mismo. Un evento raro y discreto que se afirma a sí mismo como posible contra todas las apariencias e imposibilidades estadísticas. Un acontecimiento apasionante desde cualquier punto de vista. Los extremófilos, esa familia que se encuentra vecina a los casos más extremos y apasionantes: los virus (viroma), las bacterias (bacterioma), los microbios, los parásitos, los hongos. ¿Cabe aquí mencionar que la biomasa de las bacterias es bastante mayor que la de los seres humanos?

Mientras que la física sienta las bases del reloj biológico (ritmos circadianos, metabolización, fisiología, y otros aspectos), la biología se define por el esfuerzo por arrancarle tiempo a la naturaleza física. Y lo logra, muy notablemente, en el caso de la adaptación en general, y en el caso de los seres humanos, como la ampliación de las esperanzas y las expectativas de vida. Los seres humanos, que de entrada forman parte de un género con ciclos cortos de vida, ha logrado gracias a la cultura en general, a la ciencia y a la tecnología, ganar una vida de más de lo que originariamente podría haberse pensado (Rosnay, 1993).

Como se aprecia sin dificultad, los sistemas vivos sientan y modifican al mismo tiempo las condiciones de posibilidad de su propia existencia. Ningún campo es

tan sugestivo y provocador al mismo tiempo como el estudio de las bacterias. Al cabo, hemos llegado a hacer el aprendizaje que los seres humanos (aunque no exclusivamente ellos) son holobiontes: por cada célula viva existen por lo menos diez bacterias (microbiomas) en el organismo humano. Tenemos mucho más en común con la naturaleza que de específico de los seres humanos.

Desde prácticamente cualquier punto de vista los sistemas vivos en general son excepciones, eventos raros. La expresión acaso más gruesa de su existencia es el hecho de que en la escala planetaria, el metabolismo global de los seres vivos modifica profundamente la composición de la atmósfera terrestre, de tal suerte que no existen condiciones anteriores a la aparición y surgimiento de la vida, sino, en su misma evolución, los sistemas vivos van adaptando las condiciones para que sean propicias, ellos mismos se adaptan a las presiones del medioambiente y del clima, y modifican a la vez la composición de la atmósfera terrestre a escala global.

Naturalmente que el clima no existe per se; existen, además, los microclimas. En cualquier caso, los biotopos resultan como un proceso inacabado, incesante de adaptación y de modificaciones que van haciendo posible el más apasionante, el más inverosímil, el más extraño de los todos los fenómenos en el universo: la vida misma — en su diversidad (genética, natural y cultural) (Holland, 1995; 1998).

4. ¿EN QUÉ SENTIDO PUEDE DECIRSE QUE LAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD SON CIENCIAS DE LA VIDA?

El estudio de la complejidad ha sido tradicionalmente considerado como el estudio de todos aquellos fenómenos, sistemas y comportamientos que no se explican ni pueden manejarse en los marcos de una campana de Gauss (o en otros términos: curva de Bell, distribuciones normales, ley de grandes números). La idea es clara. En contraste, se ha sostenido (Bak, 1996) que los sistemas complejos exhiben rasgos o propiedades de una ley de potencia.

En otras palabras, los sistemas de complejidad creciente han sido identificados por una serie de atributos muy específicos, a saber: inestabilidades, fluctuaciones, turbulencias, perturbaciones, la presencia de aleatoriedad, incertidumbre, no linealidad, emergencia, auto-organización, redes libres de escala, percolación, irrupciones (*bursts*) (Barabási, 2011), distribuciones en términos de leyes de potencia, criticalidad auto-organizada, y varios más. Manifiestamente, se trata de fenómenos, sistemas y comportamientos que no son reductibles en ninguna acepción de la palabra (irreductibilidad), son no-deterministas, en fin, no se explican con base en matrices, vectores, promedios, medias, medianas y otros rasgos semejantes.

Podría resumirse esta serie de características sosteniendo que los sistemas complejos son esencialmente impredecibles. Más exactamente, son predecibles tan sólo a corto plazo, y cuanto más inmediatamente tanto más predecibles son; pero a mediano y a largo plazo se caracterizan justamente por inestabilidades e impredecibilidad. La física estadística —que es una herramienta muy apreciada por parte de la ciencia normal o estándar—, resulta inadecuada para la comprensión y explicación de los sistemas vivos.

Precisamente en este sentido, nuevos lenguajes, nuevas metáforas, nuevas metodologías, nuevos enfoques, ciencias y disciplinas han emergido y se han transformado radicalmente, dedicadas a la tarea de comprender esta clase de fenómenos, sistemas y comportamientos. Las ciencias de la complejidad son, en toda la línea de la palabra, ciencia de punta (*spearhead science*), ciencia revolucionaria (Kuhn, 1992).

Las ciencias de la complejidad forman parte de un grupo de ciencias recientes que no tienen *objeto* –a diferencia de toda la ciencia clásica o moderna, la cual se caracterizaba porque tenía un objeto propio (en cada caso), un método, un lenguaje, una tradición, y demás. Más exactamente, las ciencias de la complejidad son ciencias como síntesis (Couloubaritsis, 2014), y se definen, si cabe la expresión, a partir de problemas de frontera. Un problema se dice que es de frontera cuando convoca a varias tradiciones científicas o disciplinarias, o bien, igualmente, cuando diferentes tradiciones, métodos y lenguajes confluyen en un problema de base común.

Pues bien, desde casi cualquier punto de vista –conceptual, categorial, fenomenológico, y otros–, los más complejos de todos los sistemas imaginables o cognoscibles son los sistemas vivos. Cabe entonces adelantar una tesis de carga al mismo tiempo científica y filosófica: las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida. Esta tesis exige una elucidación cuidadosa.

Contemporáneamente con la emergencia de las ciencias de la complejidad nacen otros grupos de ciencias con un espíritu semejante. Se trata, por ejemplo, de las ciencias de la tierra, las ciencias del espacio, las ciencias de la salud, las ciencias de materiales, en fin, precisamente, las ciencias de la vida. Las fronteras entre estos grupos de ciencias son difusas, permeables, movedizas.

De manera atávica, particularmente en el contexto anglosajón, las ciencias de la vida están fuertemente vinculadas a las ciencias de la salud, a las ciencias biológicas, al estudio de las enfermedades y el tratamiento de los pacientes.⁵ No puede afirmarse con igual validez que lo contrario sea cierto: es decir, que las ciencias de la vida sean ciencias de la complejidad. La razón estriba en el carácter disciplinar como se conciben a las ciencias de la vida, y en un fuerte sesgo de una filosofía reduccionista o determinista. Ampliamente, el determinismo y el reduccionismo son paradigmas vigentes y hegemónicos en la ciencia y la cultura. En este sentido, son ciencia normal y corresponden a la mejor tradicional de la ciencia clásica o moderna.

Las ciencias de la complejidad tienen consigo el más apasionante, difícil y raro de todos los fenómenos imaginables. La vida no es una propiedad material del universo, sino una forma de organización de la materia, de la energía y de la información, una cualidad de la propia materia, energía e información que, sin embargo, no se deja reducir a cualquiera de las tres expresiones físicas.

⁵ Un ejemplo conspicuo al respecto es la revista *Life Sciences* del grupo Elsevier: <https://www.journals.elsevier.com/life-sciences>. En el contexto francófono, o en el marco de la lengua y la cultura alemanas la situación no es muy diferente. Una mirada desprevenida a la web es suficiente para comprobar esta idea.

Podríamos decir que la vida como un *programa de investigación* surge apenas en 1942 con el bello de texto de E. Schrödinger, *¿Qué es la vida?* (Schrödinger, 2000). Naturalmente que la palabra “vida” ya existía mucho antes. Pero, no es cierto lo que sí sostiene con razón en el marco del nominalismo U. Eco (2010), que “en el nombre de la rosa está la rosa”. En la palabra *vida* no había aparecido aún, hasta Schrödinger, la vida como un programa de investigación. Omitiendo deliberadamente aquí el logro de Watson y de Crick en 1953, en la tradición de Schrödinger cabe identificar varios hitos o pasos, así: Monod (2015), Jacob (2015), Prigogine y Stengers (1983), Maturana y Varela (1998), Solé y Goodwin (2000), y muchos más hasta llegar, notablemente a Kauffman (1995; 2000).

En cualquier caso, se trata de una tradición que apenas si supera los sesenta años, o algo así, a la fecha. Y sin embargo, son apasionantes los logros y alcances que se han conseguido.

Las ciencias de la complejidad se ocupan de fenómenos alta y crecientemente contraintuitivos. Más exactamente, la “vida” no es algo que se ve, en el sentido natural de la percepción. Ciertamente vemos cadenas de péptidos, diferentes clases de RNA, el propio DNA, y otras instancias, por encima y por debajo de la célula. Es exactamente en este sentido que sostenemos que la vida no se reduce a propiedades físico-químicas, por ejemplo. La vida es un fenómeno que no vemos, sino que lo *concebimos*; si cabe, lo *imaginamos* a cada instante.

Podemos traducir esta idea en los siguientes términos. La enfermedad es algo que vemos (en última instancia, las ciencias de la salud, la medicina y las ciencias de la vida descansan, desde este punto de vista en la patología). Es ulteriormente en la patología en donde, literalmente, se ve la enfermedad. Por el contrario, la salud no es algo que propiamente se vea; se la adivina, se la intuye, se la concibe, si se nos permite esta aproximación.

Digámoslo de forma franca y directa: las ciencias de la complejidad nos ayudan enormemente a pensar lo impensado en la historia de las ciencias de la salud y de las ciencias de la vida: la salud. Estas siempre han pensado únicamente (la) enfermedad: epidemias, pandemias, contagio, morbilidad, mortalidad, y demás. Mientras que la enfermedad es un fenómeno determinado y que hay que determinar, salud es esencialmente indeterminada, abierta. Si apenas llevamos algo más de sesenta años o algo así pensando la vida, llevamos en verdad mucho menos tiempo tratando de pensar (la) salud. La forma tradicional y normal ha sido en términos de “determinantes de la salud” (sic).

Sólo que salud es un caso particular, apasionante y definitivamente significativo de vida. Pero la vida implica incertidumbre, indeterminación, fluctuación, inestabilidades, cambios súbitos, imprevistos e irreversibles, y demás rasgos y atributos propios de los sistemas complejos.

Como se aprecia sin dificultad, las ciencias de la complejidad implican la formación o el desarrollo de una estructura mental.

Hay varias formas de comprender a esta estructura mental, además de lo que se ha dicho hasta el momento:

- Desde el punto de vista metodológico, el estudio de los sistemas vivos no se reduce a una heurística determinada; mucho mejor aun, un rasgo distintivo de las ciencias de la complejidad –acaso único– es el recurso a metaheurísticas (Doerner, et al., 2007). Dicho de manera puntual: se trata de la identificación de problemas exactos con vista en el trabajo en espacios de solución, en la búsqueda de soluciones aproximadas. Como es sabido en la investigación de punta, las soluciones aproximadas son bastante más precisas y óptimas que las soluciones exactas.
- Desde el punto de vista lógico, los sistemas complejos no pueden ya trabajarse, en absoluto, con base en la lógica formal clásica –que es la lógica simbólica, la lógica matemática, la lógica de predicados o la lógica proposicional; cuatro maneras diferentes de apuntar en una sola y misma dirección–. En efecto, la lógica formal clásica es bivalente, y las dinámicas, las estructuras, los comportamientos y las características de los sistemas vivos no pueden reducirse a una estructura mental de bivalencia (1 o 0). Exactamente en este sentido las lógicas no-clásicas⁶ resultan de inmensa ayuda en la comprensión de la complejidad (Maldonado, 2017a). A pesar de que, *grosso modo*, hasta la fecha, ni los complejólogos le han puesto atención a las lógicas no-clásicas, ni en general la comunidad de lógicos se interesa en la complejidad.
- De manera muy significativa, la complejidad implica un nuevo tipo de relación con la naturaleza, lo cual, como se observa con facilidad, implica una transformación radical de la estructura mental (y efectiva y emocional, desde luego). Mientras que el modo tradicional de relación con la naturaleza fue en términos de medios a fin, en el que los seres humanos se situaban a sí mismos como externos y superiores a la naturaleza, las ciencias de la complejidad, mucho mejor, el problema de la vida y los sistemas vivos, plantean una transformación radical: la vida no es algo ajeno y distinto a los sistemas abióticos mismos. No existe absolutamente ninguna línea demarcatoria entre sistemas bióticos y abióticos: ambos constituyen un *continuum* vago. La naturaleza emerge como la base de cualquier valor, idea y posibilidad, y éstos se remiten a ella como a la fuente de sentido y significación. Simple: cualquier pelea del ser humano con la naturaleza (= competencia, competitividad, lucha por los recursos naturales, etc.), la lleva perdida el ser humano.
- Desde el punto de vista de la organización del conocimiento, las ciencias de la complejidad permiten y demandan al mismo tiempo otras estructuras y dinámicas diferentes a las habidas tradicionalmente, hasta la fecha. Nuevos conocimientos dan lugar a nuevas formas de organización social del conocimiento. Si la ciencia clásica surge de la mano de las universidades, las nuevas

⁶ Ejemplos de lógicas no-clásicas son: la lógica difusa, la lógica polivalente, la lógica modal, la lógica multimodal, la lógica del tiempo, las lógicas paraconsistentes, la lógica de contrafácticos, la lógica cuántica, la lógica doxástica y la lógica epistémica, la lógica dinámica, la lógica de la ficción, la lógica erótica, la lógica alética, y varias más.

ciencias surgen, adicionalmente, en otros espacios alternativos: centros e institutos de investigación, vínculo entre la universidad, el sector privado, la sociedad civil y el sector público, en formas perfectamente horizontales de cooperación. La fenomenología al respecto es reciente, pero altamente sugestiva.

- Desde el punto de vista semántico, nuevos conceptos, nuevas categorías, pero también nuevas metáforas y símiles emergen y se acuñan con la intención de aprehender idóneamente los nuevos fenómenos, sistemas y comportamientos que tenemos ante nosotros, con nosotros. Es constante la aparición de nuevas expresiones que combinan muy bien lógica y metodología por un lado, y tropología (esto es, metáforas, símiles, sinécdoques, metonimias, y otras figuras literarias) por el otro. Los neófitos en el estudio de la complejidad son particularmente sensibles a esta circunstancia. Deben aprender nuevos lenguajes, nuevos términos, en fin, una nueva estructura mental.
- El modelamiento y la simulación constituyen la forma más acabada de las nuevas revoluciones científicas y tecnológicas en curso. Hoy por hoy es prácticamente imposible trabajar en investigación de punta al margen del dominio de lenguajes de programación y la incorporación de modelamientos y simulaciones. La apariencia pudiera dar la sensación de que se trataría aquí de un reduccionismo computacional (o informacional). Sin embargo, el aprendizaje de lenguajes de programación constituye un rasgo estructural –por ejemplo, generacional– que permite establecer un contraste en ciencia clásica y ciencia de punta. Esta afirmación llega hasta tal punto que, por ejemplo, es cada vez más difícil hacer ciencia e investigación de punta al margen de la ciencia de grandes bases de datos; la analítica de datos, por ejemplo. Y esto es así, aunque la ciencia de grandes bases de datos no tiene nada que ver con complejidad.

Estas caracterizaciones de las nuevas estructuras mentales que implican las ciencias de la complejidad no quieren ser exhaustivas, pero sí apuntan en una dirección precisa que permite ver contrastes, matices, gradientes, en fin, forma y dinámicas novedosas y diferentes de las tradicionales.

5. CONCLUSIONES

Este texto ha avanzado una tesis fuerte. Las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida. Se han aportado argumentos, señalamientos, indicios, pruebas, evidencias de distinto grado y modo. La buena ciencia no se hace con base en la construcción de consensos y acuerdos. Por el contrario, la buena ciencia consiste en desplazar el foco de la mirada, sugerir inflexiones y pliegues, en mostrar intersticios y rizomas, si cabe la expresión.

La masa crítica de las ciencias de la complejidad es creciente. Cada vez más eventos académicos, publicaciones, revistas y libros aparecen en el mundo. Existen

magníficos vectores en las redes sociales dedicados enteramente a la complejidad (redes complejas, inteligencia artificial, vida artificial, y otros). No existe prácticamente ninguna gran universidad en el mundo que no tenga ya grupos de investigación dedicados a la complejidad, y se han creado estudios de posgrado a niveles diferentes, así como centros e institutos de diversa índole dedicados al tema. Pero es igualmente cierto que las ciencias de la complejidad son aún ciencia alternativa, disidente, marginal. La ciencia normal predomina ampliamente, la financiación de la investigación está muy ampliamente dedicada a ella, en fin, los currículos en todos los niveles de la educación abundan en disciplinariedad, determinismo, reduccionismo, linealidad, la búsqueda de máximos, el trabajo con óptimos, etc.

Nos encontramos, según parece, en medio de una auténtica revolución científica, actualmente. ¿Vale recordar con Kuhn (1992; capítulo décimo) que toda revolución científica es también una revolución política? Lo que es evidente es que en las revoluciones, algunas veces, algunos, con las razones equivocadas están en el bando correcto; y en otras ocasiones, otros, con las razones correctas están en el bando equivocado. Desiderativamente debería ser posible que quienes están con las razones correctas estén en el bando correcto. Pero esto se dice fácilmente. Hay fuertes dinámicas sociales que complican enormemente la situación.

Cada época desarrolla la ciencia que puede, y cada época desarrolla la ciencia que necesita. Es absolutamente evidente que el más sensible de todos los problemas del mundo contemporáneo consiste en entender a los sistemas vivos, en explicar la vida, en fin, en comprender cómo la vida emergió y cómo se hace posible. Pero, al mismo tiempo, de forma paralela, es evidente que nos encontramos en un cuello de botella. Los más importantes, inteligentes, peligrosos y trágicos problemas tienen que ver hoy por hoy con el calentamiento global, la sexta extinción masiva en curso, la desertificación y la tala de bosques, la acidificación de los mares, la polución y la contaminación en todas sus formas y niveles, la sobrepoblación, la inequidad, la pobreza, y la injusticia, para mencionar tan sólo los más inminentes. Por primera vez desde que aparecieron esos homínidos que se llaman a sí mismos *Homo sapiens sapiens*, ha llegado a ser evidente que su futuro no está asegurado de ninguna manera, y ciertamente no de una vez y para siempre. Los seres humanos se han puesto en peligro de extinción a sí mismos, conjuntamente con la depredación de la naturaleza y la extinción en masa de numerosas otras especies. Los seres humanos han roto todos los balances y equilibrios de la naturaleza. En fin, la vida es algo que ya no va de suyo, y su futuro no está garantizado en el corto o en el mediano plazo, en manera alguna.

Hoy, comprender la vida es una sola y misma cosa que comprender cómo puede ser posible y cada vez más posible. Digámoslo de forma directa y contundente: estamos comenzando a considerar la posibilidad de pensar como la naturaleza, y no ya simplemente como seres humanos, en cualquier acepción de la palabra. Un problema de la máxima complejidad conocida. Las ciencias de la complejidad corresponden exactamente a esta época que mencionamos, a estos desafíos y retos. Y creemos que, así, las ciencias de la complejidad tienen sentido. Al fin y al cabo, el tema de base, por primera vez, en toda la escala de la palabra, en cualquier marco

o dimensión que se prefiera, aunque siempre con énfasis y modos propios, la vida es el problema filosófico y científico *par excellence*. Jamás la humanidad se había enfrentado a escala global con un grupo de cuestionamientos semejantes.

Las ciencias de la complejidad tienen como finalidad comprender la vida, cómo surgió y cómo se ha hecho posible, su diversidad y pluralidad, sus retos, límites y desafíos. Por primera vez, una expresión de la vida no es más importante que la demás, pues todas se implican recíproca y necesariamente. Lo dicho: son ciencias de la vida. Una expresión reciente que demanda, hacia futuro, de ulteriores elaboraciones y desarrollos.

BIBLIOGRAFÍA

- Acot, P., 2005. *Historia del clima. Desde el big bang a las catástrofes climáticas*. Buenos Aires: Ed. El Ateneo.
- Bak, P., 1996. *How nature works. The science of self-organized criticality*. Springer Verlag.
- Barabási, A.-L., 2003. *Linked. How everything is connected to everything else and what it means for business, science, and everyday life*. New York: Plume Book.
- Barabási, A.-L., 2011. *Bursts. The hidden patterns behind everything we do, from our e-mail to bloody crusades*. New York: Plume Books.
- Barrat, A., Barthélemy, M. & Vespignani, A., 2008. *Dynamical processes on complex networks*. Cambridge University Press.
- Bedau, M. A., and Cleland, C. E., (Eds.), 2010. *The nature of life. Classical and contemporary perspectives from philosophy and science*. Cambridge University Press.
- Brockman, J., 1991. *The third culture: beyond the scientific revolution*. New York: Touchstone.
- Byrne, D. & Callaghan, G., 2014. *Complexity theory and the social sciences: The state of the art*. London and New York: Routledge.
- Casti, J., 1998. Complexity and aesthetics. *Complexity*, 3(5), may/june, pp. 11–16.
- Chaisson, E. J., 2000. *Cosmic evolution. The rise of complexity in nature*. Oxford University Press.
- Christian, D., 2005. *Mapas del tiempo. Introducción a la "gran historia"*. Barcelona: Crítica.
- Couloubaritsis, L., 2014. *La philosophie face à la question de la complexité. La défi majeur du 21e siècle. Tome 1: Complexités. Intuitive, archaïque et historique. Tome 2: Complexités scientifique et contemporaine*. Bruselas: Ousia.
- Cowan, G. A., Pines, D. & Meltzer, D., 1999. *Complexity. Metaphors, models, and reality*. Cambridge, MA: Perseus Books.
- Doerner, K. F., Gendreau, M., Greistorfer, P., Gutjahr, W. J., Hartl, R. F., Reimann, M., (Eds.), 2007. *Metaheuristics. Progress in complex systems optimization*. Springer Verlag.
- Eco, U., 2010. *El nombre de la rosa*. Madrid: Penguin-Random House.
- Érdi, P., 2008. *Complexity Explained*. Berlin: Springer Verlag.
- Gell-Mann, M., 2005. *El quark y el jaguar. Aventuras entre lo simple y lo complejo*. Barcelona: Tusquets.
- Gleick, J., 2008. *Chaos. Making a new science*. Penguin Books.
- Hey, T. & Pápay, G., 2014. *The Computing Universe*. Cambridge University Press.
- Holland, J., 1995. *Hidden order: How adaptation builds complexity*. Reading, MA: Perseus Books.

- Holland, J., 1998. *Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Jablonka, E. & Lamb, M. J., 2004. *Evolution in four dimensions. Genetic, epigenetic, behavioral, and symbolic variation in the history of life*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Jacob, F., 2015. *El juego de lo posible*. México, D.F.: FCE.
- 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.
- Kuhn, T.S., 1992. *La estructura de las revoluciones científicas*. México, D.F.: FCE.
- Lewin, R., 1994. *Complejidad. El caos como generador del orden*. Barcelona: Tusquets.
- Lineweaver, Ch.H., Davies, P.C.W. & Ruse, M., (Eds.), 2013. *Complexity and the arrow of time*. Cambridge University Press.
- Lloyd, S., 2007. *Programming the universe: A quantum computer scientists takes on the cosmos*. Vintage Books.
- Lorenz, E., 2000. *La esencia del caos. Un campo de conocimiento que se ha convertido en parte importante del mundo que nos rodea*. Madrid: Debate.
- Maldonado, C.E., 2016a. *Complejidad de las ciencias sociales. Y de las otras ciencias y disciplinas*. Bogotá: Ed. Desde Abajo.
- Maldonado, C.E., 2016b. El evento raro. Epistemología y complejidad. *Cinta de Moebio. Revista de Epistemología de Ciencias Sociales*, 56, pp.187–196. Disponible en el sitio web: <http://www.moebio.uchile.cl/56/maldonado.html>.
- Maldonado, C.E., 2017a. *Pensar. Las lógicas no-clásicas*. Bogotá: Ed. Universidad El Bosque.
- Maldonado, C.E., 2017b. Hipercomputación biológica y comunicación entre los seres vivos. En: Arboleda, L.C., (ed.), *Un Festschrift para José Luis Villaveces*. Bogotá: Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, pp.109–124.
- Maldonado, C.E. & Gómez-Cruz, N., 2015. Biological Hypercomputation: A New Research Problem in Complexity Theory. *Complexity*, 20(4), pp.8–18.
- Maturana, H. y Valera, F., 1998. *El árbol del conocimiento. Las raíces biológicas el entendimiento humano*. Santiago de Chile: Lumen
- Mitchell, M., 2009. *Complexity. A guided tour*. Oxford University Press.
- Mitchell, S.D., 2003. *Biological complexity and integrative pluralism*. Cambridge University Press.
- Monod, J.L., 2015. *El azar y la necesidad. Un ensayo sobre la filosofía natural de la biología moderna*. Barcelona: Tusquets.
- Moore, D.S., 2015. *The developing genome. An introduction to behavioral epigenetics*. Oxford University Press.
- Morris, I., 2016. *¿Por qué manda Occidente... por ahora?* Barcelona: Ático de los libros.
- Nowak, M.A., 2011. *Supercooperators: Altruism, evolution, and why we need each other to succeed*. New York: Free Press.
- Page, S.E., 2011. *Diversity and complexity*. 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.
- Prigogine, I. y Stengers, I., 1983. *La nueva alianza. La metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza Universidad.
- Rescher, N., 1998. *Complexity: A philosophical overview*. London: Routledge.
- Rosnay, J. de., 1993. *Los senderos de la vida*. México, D.F.: FCE.

- Ruelle, D., 1995. *Azar y caos*. Madrid: Alianza Editorial.
- Schrödinger, E., 2000. *¿Qué es la vida?* Barcelona: Tusquets.
- Schryock, A., and Lord Smail, D., 2011. *Deep history. The architecture of past and present*. Berkeley: University of California Press.
- Scott, A. C., 2007. *The Nonlinear Universe: Chaos, Emergence, Life*. Berlin: Springer Verlag.
- Snow, C.P., 2012. *The two cultures*. Cambridge University Press.
- Solé, R. & Goodwin, B., 2000. *Signs of life. How complexity pervades biology*. New York: Perseus Books.
- Stewart, I., 1998. *Life's other secret: The new mathematics of the living world*. Wiley.
- Strogatz, S., 2003. *Sync: How order emerges from chaos in the universe, nature, and daily life*. New York: Hyperion.
- Volk, T., 1998. *Gaia's Body: Toward a Physiology of Earth*. New York: Springer Verlag.
- Waldrop, M.M., 1993. *Complexity. The emerging science at the edge of order and chaos*. New York: Touchstone Book.
- Watts, D., 2004. *Six Degrees. A science of a connected age*. New York/London: W.W. Norton & Co.
- Wilson, E.O., 2012. *The social conquest of Earth*. New York/London: W. W. Norton & Co.