COMPLEXUS

Revista de Complejidad, Ciencia y Estética

Volumen 5
Octubre de 2009
Número 1

REVISTA COMPLEXUS
Complejidad, Ciencia y Estética

ISSN 0718-1515

Representante Legal

Corporación SINTESYS
Avda. Holanda, 3607. Nuñoa, Santiago Chile
Teléfono: +562 2236531
E-mail: corporacion@sintesys.cl

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© *SINTESYS*

Equipo Editorial

Editor General

Dr. Leonardo Lavanderos
Corporación Sintesys
Santiago, Chile

Coordinación Editorial

Vanesa Plaza P.
Corporación Sintesys
Santiago, Chile

Diseño Gráfico

Carlos Ramos

Comité Editorial

Dr. Ignacio Ayestarán
Departamento de Filosofía
Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
España

Dr. Carlos Delgado
Departamento de Filosofía
Universidad de La Habana
Cuba

Dr. Alejandro Malpartida
Ciencias Naturales y Ecología
Buenos Aires, Argentina

Daniel Malpartida
Psicoanálisis
Corporación Sintesys
Santiago, Chile

Esteban Muñoz
Psicología
Corporación Sintesys
Santiago, Chile

Nuriluz Hermosilla
Departamento de Ciencias Sociales
Universidad de Chile

Contenidos

EDITORIAL 5

Ignacio Ayestarán

SISTEMAS COMPLEJOS Y CIENCIA DE LA SOSTENIBILIDAD:
UNA PROPUESTA ONTO-EPISTÉMICA Y ÉTICA 8

Carlos E. Puente

MÁS LECCIONES A PARTIR DE LA COMPLEJIDAD.
UNA PARÁBOLA PERENNE Y ACASO URGENTE EN LA TEORÍA DEL CAOS 32

Anunziata Elisa Di Salvo

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL
NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL 53

Paulina Larrosa López e Iván Oliva Figueroa

SENTIDO Y COMPLEJIDAD: CONVERGENCIAS Y DIVERGENCIAS
EN DISTINTOS CONCEPTOS DE FORMACIÓN DOCENTE 72

Carlos E. Puente

AUN MÁS LECCIONES A PARTIR DE LA COMPLEJIDAD.
LA IMPOTENCIA DE LAS LEYES DE POTENCIA Y LA FORTALEZA DE UNA CAMAPANA 84

Acerca de Complexus

Complexus es una revista electrónica dedicada a la ciencia desde la estética de la complejidad,que define su labor editorial en la proyección y difusión de la vanguardia de la creación científica desde múltiples disciplinas integradas en las teorías de la complejidad.

Nuestro objetivo es al desarrollo del arte y las ciencias en la responsabilidad de su aplicación en la construcción de nuestras sociedades, enfocando esta labor al cambio de paradigma en la teoría del conocimiento.

Creada en 2004, Complexus abre su espacio de reflexión y discusión con el fin de construir las bases para la creación de un referente latinoamericano de las ciencias cognitivas, desde donde emerjan las estructuras imaginarias que nutran las bases cognitivas de lo estético, formulando un arte que descansa en un contexto de *significado y sentido* de los procesos de conocimiento.

Encontramos que mediante el concepto de relación como base conceptual de nuestro conocer, y con el pensamiento de que junto a la *poiesis*, 'creación', raíz de la palabra poesía y de muchos términos de la ciencia y el arte, el arte-ciencia es un modo de vivir creando el mismo campo experiencial que se desea explicar, una configuración del mundo en el que el propio observador está integrado. Al pretender que no lo está, como en las narrativas cartesianas predominantes en el pensamiento hasta ahora, generamos una flagrante contradicción conceptual, que nos ha llevado a los distintos 'callejones sin salida' que podemos encontrar en el panorama de la Historia reciente.

En este sentido, nuestra labor no se encuentra ajena a la significación de la idea de *globalización*, mediante la cual se nos imponen formas de territorialidad que de alguna manera 'deben' responder a una idea intencionadamente prefijada de 'lo global'.

El conocer como espacio relacional nos invita a un acto donde lo estético formula la base de la explicación sobre el mundo: la tautología y el amarre a la configuración de distinciones, es desde donde cada red construye lo simbólico como proceso de intercambio de territorialidades.

Les ofrecemos esta invitación desde la estética y la epistemología para una *poesciencia*. Esta es una invitación a lo irreversible, al no-equilibrio y a la incertidumbre, donde para crear sólo se necesita de novedad, tradición, proceso y emergencia. Para emprender el camino de conocimiento que les invitamos a recorrer basta sólo con recordar, haciendo consciente la experiencia arraigada en nuestra situación y circunstancia.

Bienvenidos a Complexus.

Colaboradores y objetivos

Nuestra revista extiende su rango de acción desde América Latina hacia el resto de latitudes donde existan redes abiertas al desarrollo de nuevos paradigmas y desde la conciencia de la profunda vinculación que existe entre nuestras culturas americanas y las europeas, con el fin de crear un nuevo espacio de pensamiento y diálogo entre las nuevas tendencias de las Ciencias de la Complejidad. La concepción relacional está inmersa en la experiencia, en la situación y circunstancia, no hay posibilidad de experiencia a-histórica.

La revista Complexus construye sus objetivos en la idea de Complejidad, Ciencia y Estética, inmersa en la vasta tarea de diseñar y articular las redes desde las cuales emergerá la narrativa-discurso por donde el sujeto-cultura del siglo XXI se verá inmerso en la construcción de una nueva Ciencia-Arte, entrelazando y fundiendo los afectos en la fragua de la creación y el desarrollo del conocimiento.

Los lectores y colaboradores de Complexus son académicos, profesionales consultores, artistas, científicos para los cuales el paradigma cartesiano positivista ha empezado a ser un límite a superar y que han encontrado en este espacio un lugar de apertura a temas que nunca han debido estar escindidos ni separados. Les invitamos a entrar y compartir este espacio de creación en la Complejidad, y abrimos nuestras puertas a toda opinión, pensamiento o sentir que pueda surgir a partir de las nuevas ideas que periódicamente tenemos la fortuna de compartir desde esta plataforma de difusión del nuevo pensamiento.

Una reflexión sobre los paradigmas alternativos que nacen del panorama de conocimiento y creación actual. Con todo el rigor y creatividad emergentes del arte y las ciencias, les invitamos a participar en Complexus, una reflexión sobre los paradigmas alternativos que nacen del panorama de conocimiento y creación actual.

C O M
P L E
X U S

Revista de Complejidad, Ciencia y Estética

SISTEMAS COMPLEJOS Y CIENCIA DE LA SOSTENIBILIDAD: UNA PROPUESTA ONTO-EPISTÉMICA Y ÉTICA

Ignacio Ayestarán

Departamento de Filosofía
Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
ignacio.ayestaran@ehu.es

SISTEMAS COMPLEJOS Y CIENCIA DE LA SOSTENIBILIDAD: UNA PROPUESTA ONTO-EPISTÉMICA Y ÉTICA

Ignacio Ayestarán

Departamento de Filosofía
Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
ignacio.ayestaran@ehu.es

Resumen

Este artículo presenta un estudio de los sistemas complejos ante el cambio global desde la confluencia entre los sistemas sociales y los sistemas naturales, con especial atención a la complejidad que supone la ciencia de la sostenibilidad y el paradigma emergente de la ciencia del Sistema Tierra, que propugna un nuevo programa de cuestiones analíticas, metodológicas, normativas y estratégicas. Las múltiples dimensiones del cambio planetario global sólo pueden ser conocidas y examinadas desde una ciencia de la sostenibilidad integral y transdisciplinar. En consecuencia, la investigación propia de un mundo global y complejo debería inspirarse en un programa minimalista dotado de tres principios interrelacionados básicos: un principio epistémico, un principio ontológico y un principio ético de la ecología de la acción.

Palabras clave: ***Ciencia, complejidad, sostenibilidad, sistema, conocimiento, sistemas complejos, sequías y cambio climático.***

1 Este artículo es fruto del proyecto UNESCO08/20, financiado por la Cátedra UNESCO de Desarrollo Sostenible y Educación Ambiental de la UPV/EHU.

1. Sistemas Complejos, Sequías y Cambio Climático

De acuerdo con Rolando García, un sistema complejo es una representación de un recorte de la realidad, conceptualizado como una totalidad organizada (de ahí la denominación de 'sistema'), en la cual los elementos no son separables, y por tanto, no pueden ser estudiados aisladamente (García, 2006). Este autor también ha definido los sistemas complejos como aquellos sistemas en los que los procesos que determinan su funcionamiento son el resultado de la confluencia de múltiples factores que interactúan de tal manera que el sistema no es descomponible, sino sólo semi-descomponible. Por eso, ningún sistema complejo puede ser descrito por la simple adición de estudios independientes sobre cada uno de sus componentes, y por tanto, suponen frecuentemente estudios interdisciplinares y transdisciplinares. Sin embargo, ello no obsta para que en un sistema complejo se puedan distinguir unos principios generales de organización y evolución. En concreto, este autor propone tres principios de organización (estratificación, articulación interna y condiciones de contorno) y dos principios de evolución (reorganizaciones y perturbaciones en su desarrollo temporal):

1. Principios de organización

1.1. Estratificación. Los factores que directa o indirectamente determinan el funcionamiento de un sistema complejo pueden ser distribuidos en niveles estructuralmente diferenciados, con sus propias dinámicas. Los niveles no son interdefinibles, pero las interacciones entre niveles son tales que cada nivel condiciona las dinámicas de los niveles adyacentes.

1.2. *Articulación interna*. El estudio de un sistema complejo comienza generalmente con una situación particular o con un conjunto de fenómenos que tienen lugar en un cierto nivel de organización (llamado 'nivel de base'). Los factores que actúan en dicho nivel corresponden a cierto tipo de procesos y a ciertas escalas de fenómenos agrupables en subsistemas constituidos por elementos entre los cuales hay un mayor grado de interconexión con respecto a los otros elementos del mismo nivel. Estos subsistemas funcionan como subtotalidades, las cuales están articuladas por relaciones que constituyen la estructura de ese nivel particular del sistema.

1.3. *Condiciones de contorno*. Las interacciones entre niveles tienen lugar por medio de distintos tipos de influencias (denominados 'flujos'), que no siempre son materiales. Los flujos pueden ser de materia, de energía, de información, de políticas, etc.. El conjunto de tales interacciones que ejercen influencia sobre un nivel dado son las condiciones de entorno o condiciones límite (o 'en los límites') de dicho nivel.

2. *Principios de evolución*

2.1. *Evolución temporal*. Los sistemas complejos sufren transformaciones en su desarrollo temporal. Esta evolución peculiar de los 'sistemas abiertos' tiene lugar tanto por procesos que modifican el sistema de forma gradual y continua como por una serie de desequilibrios y reequilibrios que conducen a sucesivas reorganizaciones.

2.2. *Fluctuaciones y perturbaciones*. Después de cada reorganización, el sistema puede permanecer con una estructura en relativo equilibrio dinámico con fluctuaciones que se mantienen dentro de ciertos límites, hasta que una 'perturbación', que exceda dichos límites, desencadene un nuevo desequilibrio.

Entendiendo los sistemas desde estos principios, también hay que hacer referencia a los procesos de los subsistemas y sus niveles de análisis, especialmente en el campo de la sostenibilidad o sustentabilidad, pues los procesos definen los cambios que tienen lugar en la dinámica de los sistemas. En este caso, las propuestas metodológicas y epistemológicas de Rolando García son de gran interés, ya que hace décadas estuvo a cargo de la Secretaría General del Programa de Investigación Global de la Atmósfera, con sede en Ginebra (Suiza), establecido por acuerdo entre la Organización Meteorológica Mundial y el Consejo Internacional de Uniones Científicas. En la década de 1960-1970, prolongadas sequías afectaron a amplias regiones de África, la India y el Noreste de Brasil, hasta el punto de que la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación llegó a declarar a principios de los años 70 que la seguridad alimentaria mundial estaba en peligro, a causa de estas catástrofes atribuidas a un incipiente cambio climático, que tuvieron un período crítico en los años 1973 y 1974. En este contexto, en 1974 la Organización de las Naciones Unidas convocó la Conferencia Mundial de los Alimentos y la Federación Internacional de Institutos de Estudios Avanzados, de la mano de Walter Roberts, organizó en

mayo de ese año un taller en el Instituto Meteorológico de Bonn (Alemania), dirigido por el climatólogo Hermann Flohn. A resultas de ese taller se elaboró la "Declaración de Bonn" ("Bonn Statement"), aprobada por la Federación Internacional de Institutos de Estudios Avanzados y distribuida posteriormente a gobiernos, agencias de Naciones Unidas y organismos de investigación. Dicha declaración tenía por tema principal "las implicaciones sociales, éticas, culturales y políticas de un posible cambio del clima". Sobre esa base, la Federación Internacional de Institutos de Estudios Avanzados instituyó el Programa 'Drought and Man' (La sequía y el hombre) bajo la dirección de Rolando García.

Como experto en dinámica de fluidos y climatología, Rolando García encabezó este programa dentro del Instituto Internacional de Estudios Superiores (miembro de la Federación Internacional de Institutos de Estudios Avanzados) desde Ginebra, dando lugar a una docena de grupos de contacto en América Latina, África, Asia y Europa, además de desarrollar un estudio especial de cambio climático en la Unión Soviética. De los datos y estudios nacidos de los grupos de investigación de ese programa, Rolando García concluyó que las raíces de la catástrofe desatada por la anomalía climática no se encontraban sólo en sequías temporales o en la sobrepoblación de las regiones afectadas, aunque estos dos factores habían contribuido notablemente en estos procesos anómalos. La catástrofe estaba cimentada en la estructura socio-económica erigida durante décadas, y no dependía sólo del factor de la sequía o de la variabilidad climática (García et al. 1981). Así, la vulnerabilidad socio-económica, unida a factores naturales y ambientales, se presentaba como un sistema complejo que analizó metodológicamente desde los problemas de la sequía y la seguridad alimentaria, a través de factores ambientales y sociales que daban lugar a diferentes niveles epistémicos y procesos interconectados.

Desde esta experiencia, Rolando García ha propuesto una revisión epistémica y metodológica de los sistemas complejos, definidos al comienzo de este artículo. Investigar uno de tales sistemas significa estudiar una parcela de la realidad que incluye aspectos físicos, biológicos, sociales económicos y políticos. Asimismo, supone una interrelación de niveles de procesos y de análisis. En los sistemas complejos se dan procesos básicos o de primer nivel, que, generalmen-

te, constituyen el efecto local sobre el medio físico o sobre la sociedad que lo habita y lo explota. Este efecto local corresponde a procesos más amplios que tienen lugar en otros niveles. Así, conviene distinguir también un segundo nivel de procesos más generales o metaprocesos, que a su vez pueden estar influidos por procesos de un tercer nivel. En problemas complejos como la sequía y la seguridad alimentaria, por caso, Rolando García (2000, 2006) lo ejemplifica así:

«Si estamos considerando un proceso de primer nivel, tal como la erosión o la salinización, los cambios introducidos en la tecnología agrícola pueden constituir un metaproceso, mientras que los cambios en el mercado o en la orientación de los créditos para la agricultura corresponderán a un proceso de tercer nivel».

En el análisis del sistema alimentario, por ejemplo, se pueden distinguir los siguientes niveles de procesos (García 2000, 2006):

1. Los procesos de primer nivel: cambios producidos en el medio físico, en los métodos de producción, en las condiciones de vida y en el sistema de relaciones socioeconómicas, asociados a modificaciones del sistema productivo de la región.
2. Los procesos de segundo nivel o metaprocesos: las modificaciones en el sistema productivo, tales como el desarrollo de cultivos comerciales, el desarrollo de la ganadería, la implantación de industrias extractivas o manufactureras, etc., que inducen cambios significativos en el primer nivel.
3. Los procesos de tercer nivel: aquí se engloban las políticas nacionales de desarrollo, las modificaciones en el mercado internacional, la internacionalización de capitales, etc., que influyen en la dinámica de los procesos de segundo nivel.

Los diferentes niveles de procesos requieren niveles de análisis específicos, diferenciados, pero interconectados. Así, por seguir con el ejemplo de la sequía y la seguridad alimentaria (García 2006, pp. 57-59), cuando se celebró la Conferencia Mundial de Alimentos organizada por la FAO en 1974, se llegó a aseverar que las reservas de grano de los países exportadores sólo alcanzaban

para pocas semanas de consumo mundial. Los expertos entonces adujeron diferentes culpables: las catástrofes naturales (como la sequía prolongada), la superpoblación, la incapacidad de los países en vías de desarrollo para incrementar su producción al ritmo de su crecimiento demográfico, la ignorancia de los campesinos que por razones culturales o educativas no se habían incorporado a la modernización de la agricultura. De acuerdo con estos culpables se desarrollaron las soluciones habituales en estos marcos epistémicos: programas de control de la natalidad, asistencia técnica para mejorar los métodos de producción y aumentar la productividad. Sin embargo, cuando Rolando García aceptó la dirección del programa Sistemas Alimentarios y Sociedad, auspiciado por el Instituto de Investigaciones de las Naciones Unidas para el Desarrollo Social, se desarrollaron líneas de investigación con una hipótesis inicial diferente: además de los ineludibles factores de la demografía y de la productividad, se postuló que existían causas sociales, económicas y políticas más profundas en la crisis alimentaria.

El enfoque para estudiar la crisis alimentaria ante la variabilidad climática fue diferente del dominante en las investigaciones corrientes, que generalmente asumen una cadena de procesos casi lineales y monocausales (producción → procesamiento → distribución → consumo), concentrándose en conceptos tales como 'seguridad alimentaria' (definida en términos de reservas de granos), 'autosuficiencia alimentaria' (definida en términos de la demanda efectiva) o 'control de la natalidad' (a menor reproducción, mayor producción). De esta manera, el énfasis se ponía en el aumento de la productividad o los circuitos de distribución comercial de alimentos, mientras que el Programa de Rolando García se planteó una pregunta diferente como punto de partida: ¿cómo y por qué se ha modificado el acceso a los alimentos, por parte de los sectores populares? El estudio se orientó así hacia la investigación de las relaciones medio físico-producción-sociedad y a la identificación de los factores que alteraron dichas relaciones, en tres niveles: procesos locales de primer nivel, procesos regionales y nacionales de segundo nivel, y procesos nacionales e internacionales de tercer nivel. Los tres niveles presentaban dinámicas y actores diversos, pero con grados de conexión e interrelación: el análisis de los procesos de tercer nivel ofrecía una explicación

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

de los de segundo nivel y el análisis de este último daba una explicación de los procesos de primer nivel. La conclusión de este nuevo enfoque complejo se concretó así (García 2006, pp. 59-60):

«Los estudios realizados sobre sistemas alimentarios ponen en evidencia que los grandes cambios introducidos en el sistema productivo, inducidos desde el segundo y el tercer nivel, han producido resultados que, con un alto grado de generalidad, pueden resumirse en los dos puntos siguientes: utilización abusiva del medio físico, con la consiguiente degradación, muchas veces irreversible, y marginación de sectores sociales que ven deteriorarse sus niveles de vida, particularmente en lo que respecta a las condiciones de trabajo y a los niveles de nutrición. Es importante señalar que todo esto puede ir acompañado de un aumento general de la producción y de la productividad, y de la incorporación en el agro de los más refinados métodos de "modernización" de la agricultura».

Transcurridas varias décadas desde aquellas sequías prolongadas provocadas por anomalías climáticas, hoy seguimos en una crisis similar, una crisis compleja de dimensiones políticas, económicas, científicas, sociales y ecológicas en torno al debate sobre el cambio climático de origen antropogénico (Ayestarán, 2004). Sin embargo, todavía se siguen planteando análisis y soluciones monocausales, desde enfoques fragmentarios y sectoriales, sin tener en cuenta estas lecciones del pasado. Afortunadamente, también hay enfoques pluridimensionales que ayudan a discernir con mayor claridad los múltiples factores y sus interconexiones en los sistemas complejos en casos como el cambio climático –máxime si se está tratando de problemas globales y planetarios–, como el ofrecido por el Worldwatch Institute (2009), por poner sólo un ejemplo.

2. Ciencias de la Complejidad y de la Sostenibilidad

El caso expuesto en la primera sección de este artículo nos hace ver que la investigación sobre la sostenibilidad de los sistemas complejos presupone una transformación cognitiva y metodológica: ante el cambio global se requiere un

cambio de paradigma científico. Siguiendo una idea del filósofo de la ciencia Karl R. Popper, María Novo (2006) ha resumido este cambio al afirmar que la ciencia debe transitar "de los relojes a las nubes". Si los relojes eran la expresión de un mundo ordenado como una maquinaria mecanicista y determinista, ahora se requiere una imagen de un mundo sumergido en una realidad compleja, difusa, fluctuante e inacabada como las nubes. Sustituir el viejo paradigma de los relojes mecánicos por el de las nubes variables sería lo propio de una época preocupada por las lluvias, las sequías, el cambio climático y la sostenibilidad.

En este sentido, desde el enfoque de los sistemas complejos se ha reivindicado en ocasiones un contrato social para la ciencia del siglo XXI, especialmente desde el ámbito más próximo a las ciencias de la complejidad, un contrato que debe reflejar estas nuevas realidades científicas y metodológicas. En un célebre artículo ya clásico, Gilberto C. Gallopín, Silvio Funtowicz, Martin O'Connor y Jerome Ravetz (2001) desarrollaron una propuesta genérica para el estudio de los sistemas socio-ecológicos complejos desde una incipiente 'ciencia de la sostenibilidad' ("sustainability science"). Según estos autores, dentro del marco de la teoría de sistemas se puede entender que las propiedades funcionales y estructurales de un organismo, de una sociedad o de otros sistemas complejos son propiedades de un conjunto, y que surgen de las relaciones e interacciones entre las partes que constituyen el sistema. El análisis sistémico de los sistemas complejos implica la identificación y comprensión de las interrelaciones causales de los sistemas. Por sistema se entiende aquí una conceptualización de una parte de la realidad definida por un conjunto de elementos interrelacionados. Estos elementos pueden ser moléculas, organismos, máquinas, entidades sociales o incluso conceptos abstractos. El comportamiento y las propiedades de un sistema surgen no sólo de las propiedades de sus elementos constituyentes, sino más bien de la naturaleza e intensidad de las interconexiones dinámicas entre ellas, tal y como ocurre en los sistemas socio-ecológicos que se estudian y evalúan en el campo temático del desarrollo sostenible.

Caracterizado el concepto de sistema de una forma rápida, estos autores distinguen entre sistemas simples (o sencillos), complicados y complejos (Gallopín et al. 2001, p. 224):

1. Un sistema es simple o sencillo si se puede representar adecuadamente utilizando una única perspectiva o descripción y mediante un modelo estándar analítico que proporcione una descripción satisfactoria o una resolución general mediante operaciones de rutina (por ejemplo, en el caso de los gases ideales o de la moción mecánica).
2. Un sistema es complicado si no se puede representar satisfactoriamente mediante la aplicación de un modelo estándar, si bien es posible mejorar la descripción o la solución mediante aproximaciones, informatización o simulación. Un sistema complicado todavía se puede definir utilizando una perspectiva única (por ejemplo, un sistema de muchas bolas de billar en movimiento, los autómatas celulares, o el patrón de comunicaciones en un gran cuadro de mandos).
3. Un sistema es complejo si es necesario utilizar dos o más perspectivas o descripciones irreductibles con el fin de definir el sistema. Los sistemas complejos comparten la propiedad de no poder ser representados mediante la aplicación de un modelo genérico a través de operaciones rutinarias.

Gran parte de los fenómenos y las características de los sistemas complejos han sido advertidos y detectados en el campo de la ciencia de la sostenibilidad, al examinar no sólo los componentes básicos de los sistemas (tanto sociales como naturales), sino también los principios básicos de organización de los mismos. Así, de acuerdo con estos autores (Gallopín et al., 2005), los sistemas complejos se caracterizan por presentar un cierto número de atributos que los diferencian de los sistemas sencillos y complicados a través de sus diversas dinámicas y sus diferenciados procesos de organización:

1. *Multiplicidad de perspectivas legítimas*. Los sistemas adaptativos complejos no se pueden entender sin considerar también su contexto, por lo que es necesario tomar en cuenta las perspectivas y los intereses de los diferentes agentes del sistema.
2. *No linealidad*. Los sistemas complejos son no lineales, de ahí que la magnitud de los efectos no sean proporcionales a la magnitud de las causas, presentando comportamientos caóticos y una gran variedad

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

de retroalimentaciones e interacciones inesperadas.

3. *Emergencia.* En los sistemas complejos emergen propiedades a partir de las interacciones entre los elementos del sistema. Ésta es una propiedad netamente sistémica, que a veces se expresa con la siguiente frase: "el todo es más que la suma de las partes".
4. *Autoorganización.* En los sistemas complejos sucede con frecuencia este fenómeno, por el cual los componentes del sistema en interacción co-evolucionan y colaboran para producir estructuras y comportamientos coordinados a gran escala.
5. *Multiplicidad de escalas.* Muchos sistemas complejos son jerárquicos y funcionan o se desarrollan en cascada, es decir, cada elemento del sistema es un subsistema de un orden menor, al tiempo que el propio sistema es un subsistema de un suprasistema de un orden mayor. Por eso presentan diferentes escalas, tanto espaciales como temporales, con diferentes ritmos y niveles de cambio, que en la práctica cognitiva y científica suponen una pluralidad epistémica y la aceptación de la incertidumbre.
6. *Incertidumbre irreductible.* En los sistemas complejos surgen diferentes fuentes y tipos de incertidumbre. Hay incertidumbres clásicas debidas a los procesos aleatorios (sometibles a análisis estadístico o probabilístico) y a la ignorancia (por falta de datos o por comprensión incompleta del sistema), pero también aparecen nuevas incertidumbres debidas a los procesos no lineales (con comportamientos caóticos), a los procesos de autoorganización (con nuevas estructuras sistémicas que emergen tras la reorganización de los elementos del sistema) y a la multiplicidad de agentes y actores (cada uno con su propio objetivo y su propia escala de desarrollo). Asimismo, en los sistemas complejos humanos hay que incluir una última fuente de incertidumbre: estos sistemas son *autoconscientes* o *reflexivos*, y pueden variar el curso de la acción tras observarse a sí mismos y tras contemplar su propia evolución (como ocurre en las llamadas 'profecías autocumplidas' o *self ful-filling prophecies* en las ciencias sociales).

Con el tiempo, la caracterización de estos sistemas complejos se ha extendido como si las nubes de la complejidad se hubieran cernido sobre los viejos relojes académicos. Desde las ciencias de la naturaleza y las ciencias de la sostenibilidad (sistemas socio-ecológicos) hasta las mismas ciencias sociales (sistemas

humanos), han terminado por incluir en sus tratados algún capítulo relativo a esta cuestión y, en ocasiones, han dedicado a tal empeño libros enteros. Por citar solamente un ejemplo de las ciencias humanas y sociales, en su obra Complexity and Postmodernism: Understanding Complex Systems, Paul Cilliers (1998, pp. 3-5) ha definido las diez características centrales de los sistemas complejos, que se resumen a continuación con algunas variantes respecto al texto original:

1. Los sistemas complejos poseen un gran número de elementos, y si ese número es suficientemente grande, es difícil que los mecanismos analíticos de modelamiento (por ejemplo, un sistema de ecuaciones diferenciales) permitan la comprensión de su comportamiento.
2. Un gran número de elementos es necesario, pero no suficiente. Un gran montón de granos de arena no constituye un sistema complejo, pues deben interactuar de manera dinámica, no estática (los sistemas complejos cambian con el tiempo). Las interacciones no son únicamente físicas, también pueden ser transferencias de información.
3. Las interacciones no son 'uno a uno', sino múltiples: cada elemento influye en otros y es influenciado por otros. Un caso típico serían las redes neuronales del cerebro.
4. Una precondición esencial de la complejidad es que las interacciones sean no-lineales. La duplicación de un estímulo no significa necesariamente la duplicación de la respuesta. Es por ello que pequeñas modificaciones en una parte pueden en ocasiones detonar grandes cambios en el sistema.
5. Las interacciones generalmente son de corto alcance, es decir, la información básicamente es recibida de los vecinos inmediatos. Eso no impide que las interacciones de largo alcance sean imposibles, especialmente si hay una riqueza de interacciones, ya que la ruta de un elemento a otro puede ser cubierta en pocos pasos. Por ello, la influencia se modula en el camino, y puede ser amplificada, reducida, modificada o eliminada de diversas maneras.
6. Las interacciones entre las partes presentan efectos de retroalimentación. El efecto de una actividad puede recaer sobre sí misma, bien directamente, bien a través de pasos intermedios. Esto da lugar a retroalimentaciones positivas (amplificaciones) o negativas (inhibiciones). El término técnico de este aspecto de los sistemas complejos es 'recurrencia'.

7. Los sistemas complejos con frecuencia son sistemas *abiertos*, esto es, interactúan con su entorno o ambiente. Por eso, en ocasiones, es difícil definir las fronteras de un sistema complejo y su definición puede depender, incluso, del marco que adopte el agente observador que lo describe. En cambio, los sistemas *cerrados* no son complejos, sino complicados, y no presentan de manera tan acuciante esta dificultad.
8. Los sistemas complejos operan en condiciones lejanas al equilibrio. Aun si están en un estado 'estable', es una estabilidad dinámica, y pueden cambiar rápidamente. Por ello, tiene que haber un constante flujo de energía para mantener la organización del sistema y asegurar su supervivencia. El equilibrio total, por falta de ese flujo de energía, es equivalente a la muerte en los sistemas.
9. Los sistemas complejos tienen historia: no sólo evolucionan en el tiempo, sino que además esa historia es co-responsable de su conducta presente. Cualquier análisis sistémico que ignore la dimensión temporal es incompleto, o sólo reproduce una situación sincrónica de un proceso diacrónico.
10. Cada elemento de un sistema complejo es ignorante de la conducta del sistema como un todo, y responde sólo a la información disponible en su entorno cercano. Si cada elemento tuviera toda la información del sistema, eso significaría que toda la complejidad del sistema estaría condensada en cada una de las partes del mismo y no haría falta analizar el sistema complejo en sus interacciones.

3. La Ciencia del Sistema Tierra

La prolongación del estudio de los sistemas complejos, especialmente de los sistemas socio-ecológicos, ha conducido finalmente a una revolución silenciosa en el seno de las Ciencias de la Tierra. La fecha de inicio de esta revolución se puede datar en el año 2001, cuando delegados de más de 100 países que participan en los principales programas de investigación internacional sobre el cambio ambiental global hicieron suya la "Declaración de Ámsterdam". Esta declaración admitía que las investigaciones llevadas a cabo durante la última década habían demostrado un consenso en torno a cinco puntos que incidían en el estu-

dio de la Tierra en su conjunto como un sistema (Moore III, Underdal, Lemke y Loreau 2002, pp. 207-208):

1. La Tierra se comporta como un sistema único y autorregulado, formado por componentes físicos, químicos, biológicos y humanos.
2. Las actividades humanas están influyendo significativamente en el ambiente de la Tierra de numerosas maneras, además de las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático.
3. El cambio global no puede ser entendido en términos de un simple paradigma de causa-efecto. Los cambios impulsados por el ser humano causan efectos múltiples en cascada que recorren el Sistema Tierra por vías complejas.
4. La dinámica del Sistema Tierra se caracteriza por umbrales críticos y cambios abruptos. Las actividades humanas podrían desencadenar inadvertidamente tales cambios, con severas consecuencias para el ambiente y los habitantes de la Tierra.
5. En términos de algunos parámetros ambientales claves, el Sistema Tierra se ha movido claramente fuera del rango de la variabilidad natural exhibido por lo menos a lo largo del último medio millón de años.

Tras la Declaración de Ámsterdam se propuso consolidar un programa que evaluara las principales cuestiones metodológicas del paradigma emergente de la Ciencia del Sistema Tierra (Earth System Science). Para ello se cogió como referencia el programa que propuso en su día el matemático David Hilbert. En 1900, dentro de la Conferencia Mundial de Matemáticas en París, Hilbert lanzó un monumental programa para evaluar los avances de las matemáticas en el siglo XX. Este programa consistió básicamente en una ecléctica lista de 23 problemas que debían ser resueltos por la comunidad científica. De modo similar, la comunidad científica internacional del Sistema Tierra ha elaborado su propio programa hilbertiano (Schellnhuber y Sahagian, 2002; Clark, Crutzen y Schellnhuber, 2004; Schellnhuber, Crutzen, Clark y Hunt, 2005; y Costanza, Graumlich y Steffen 2007), con un listado de 23 preguntas cruciales que deben abordarse para la sostenibilidad global. Este programa para la comprensión del Sistema Tierra

surgió tras un congreso organizado en 2001 por GAIM , el laboratorio de ideas transdisciplinario del programa internacional IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme). Su propuesta programática se postula como un campo de estudio e investigación para el siglo XXI, por medio de una lista de estas preguntas, organizadas en cuatro bloques destacados, a saber, cuestiones analíticas, metodológicas, normativas y estratégicas, respectivamente:

A- Cuestiones analíticas:

1. ¿Cuáles son los órganos vitales de la ecosfera desde el punto de vista del funcionamiento y de la evolución?
2. ¿Cuáles son los principales patrones dinámicos, las teleconexiones y los bucles de retroalimentación en la maquinaria planetaria?
3. ¿Cuáles son los elementos críticos (umbrales, cuellos de botella, transiciones) en el Sistema Tierra?
4. ¿Cuáles son las escalas temporales y los regímenes característicos de la variabilidad natural del planeta?
5. ¿Cuáles son los regímenes de las perturbaciones antropogénicas y de las teleperturbaciones que importan desde el nivel del Sistema Tierra?
6. ¿Cuáles son los órganos vitales de la ecosfera y los elementos planetarios críticos que pueden ser transformados por la acción humana?
7. ¿Cuáles son las regiones más vulnerables en los cambios globales?
8. ¿Cómo son procesados los fenómenos extremos y abruptos a través de las interacciones naturaleza-sociedad?

B-Cuestiones operativas:

9. ¿Cuáles son los principios para la construcción de 'macroscopios' (*macroscopes*), es decir, representaciones del Sistema Tierra que agreguen detalles sin cesar, manteniendo al mismo tiempo todos los ítems de los órdenes sistémicos?
10. ¿Qué niveles de complejidad y resolución tienen que ser alcanzados en los modelos del Sistema Tierra?
11. ¿Es posible describir el Sistema Tierra como una composición de regiones y órganos débilmente acoplados, y es posible reconstruir

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

la maquinaria planetaria desde estas piezas?

12. ¿Cuál podría ser la estrategia global más eficaz para la generación, transformación e integración de la serie de datos relevantes del Sistema Tierra?
13. ¿Cuáles son las mejores técnicas para analizar y, en la medida de lo posible, predecir eventos irregulares?
14. ¿Cuáles son las metodologías más apropiadas para la integración del conocimiento entre las ciencias naturales y las ciencias sociales?

C- Cuestiones normativas:

15. ¿Cuáles son los principios y criterios generales para distinguir los futuros sostenibles y no-sostenibles?
16. ¿Cuál es la capacidad de carga de la Tierra?
17. ¿Cuáles son los dominios accesibles pero intolerables en el espacio de la co-evolución entre la naturaleza y la humanidad?
18. ¿Qué tipo de naturaleza quieren las sociedades modernas?
19. ¿Cuáles son los principios de equidad que deberían gobernar la gestión global del medio ambiente?

D- Cuestiones estratégicas:

20. ¿Cuál es la combinación óptima de medidas de adaptación y mitigación para responder al cambio global?
21. ¿Cuál es la óptima descomposición de la superficie del planeta en reservas naturales y áreas gestionadas?
22. ¿Cuáles son las opciones y advertencias ante soluciones tecnológicas como la geoingeniería y la modificación genética?
23. ¿Cuál es la estructura de un sistema eficaz y eficiente para las instituciones ambientales y de desarrollo globales?

Todas estas iniciativas, desde la Declaración de Ámsterdam hasta la formulación del programa hilbertiano de la Ciencia del Sistema Tierra, suponen la consolidación de un paradigma dedicado a la ciencia de la sostenibilidad global, con una nueva perspectiva de las interacciones del planeta como un gigantesco

sistema complejo, donde confluyen intereses de todas las disciplinas científicas, tanto de las ciencias de la naturaleza como de las ciencias sociales (véase el punto 14 del programa hilbertiano descrito ut supra), a la búsqueda de un conocimiento emergente que integre las preocupaciones globales por la sostenibilidad presente y futura.

4. La Sostenibilidad Transdisciplinar

Desde el enfoque de los sistemas complejos, incluido el Sistema Tierra, las múltiples dimensiones del cambio planetario global sólo pueden ser estudiadas desde una ciencia de la sostenibilidad global y transdisciplinar, que incluya tanto ciencias disciplinares naturales como humanas y sociales, a fin de comprender e integrar diversos fenómenos complejos interrelacionados, desde los mecanismos biogeoquímicos de la biosfera y el comportamiento y la distribución de organismos y ecosistemas, hasta los avances tecnológicos, las contingencias históricas y socioeconómicas, y las axiologías variables de valores políticos y éticos en juego. Problemas ambientales complejos como el cambio climático de origen antropogénico sólo pueden ser diagnosticados y evaluados si se apela a una multiplicidad de disciplinas y saberes. A modo de ejemplo, algunos autores (Duarte et al., 2006) han descrito algunas de las disciplinas científicas básicas y sus aportaciones fundamentales para estudiar el cambio climático global:

- *Paleociencias*: su aportación es clave para la reconstrucción de climas y biosferas pasadas que permitan comprobar la fiabilidad de modelos climáticos desarrollados para predecir climas futuros.
- *Física de la atmósfera:* su contribución proporciona modelos climáticos, predicción climática, modelización de eventos extremos (ciclones, etc.).
- *Oceanografía:* estudia el papel del océano y su biota en la regulación climática y del funcionamiento del Sistema Tierra, además de analizar el aumento del nivel del mar.
- *Ecología*: investiga las huellas del cambio global en los organismos, las poblaciones y los ecosistemas, las posibles extinciones, las conse-

cuencias para el funcionamiento de la biosfera y los servicios que ésta proporciona a la sociedad.

- *Ciencias de la Tierra*: son fundamentales para la dinámica de la hidrosfera, de la atmósfera y de la criosfera, para los intercambios de materiales y respuestas al cambio global, para la dinámica de la línea de costa en respuesta al cambio global, entre otros fenómenos.
- *Biología molecular*: puede analizar las consecuencias del cambio global sobre la expresión génica, así como el papel de la diversidad genética sobre la adaptación al cambio global.
- *Biogeoquímica*: es básica para la regulación del ciclo de elementos activos en la regulación climática y los elementos biogénicos, así como para la acidificación del océano.
- *Química*: desarrolla aspectos tan necesarios como la química atmosférica o los flujos de contaminantes orgánicos persistentes.
- Hidrología: estudia los impactos del cambio global sobre la hidrosfera y el ciclo de agua, y otros aspectos relevantes como la dinámica de acuíferos.
- *Historia*: posibilita la reconstrucción de cambios en el uso de recursos por la humanidad, así como las consecuencias de cambios ambientales a escala regional sobre civilizaciones pasadas.
- *Teoría de los sistemas complejos y ciencias de la complejidad:* resultan esenciales para describir los comportamientos no lineales y los procesos caóticos en el Sistema Tierra.
- *Ciencias de la salud:* detectan el impacto del cambio global sobre la salud humana (enfermedades emergentes, interacción entre agentes químicos y cambios ambientales, etc.).
- *Sociología*: proporciona y escruta la percepción pública del cambio global, los mecanismos de consenso y gobernanza globales, la organización social de los sistemas humanos.
- *Economía*: aporta el análisis del impacto económico del cambio global, así como el debate sobre las tasas de descuento para las generaciones futuras.
- *Computación y matemáticas:* facilita algoritmos eficientes en modelos de circulación global, en la propagación de incertidumbre en modelos y en el enlazado de modelos de distintas escalas.

Como se puede colegir de lo expuesto hasta aquí, el esfuerzo implícito para la Humanidad a fin de articular un saber transdisciplinar global para los problemas ambientales complejos va a suponer una nueva forma de valorar la ciencia, más allá del diseño de modelos y la medición de indicadores al uso, llegando hasta las fronteras de los valores éticos y filosóficos. Así, Juan Negrillo, representante de The Climate Project Spain, declaraba una buena anécdota (cf. periódico El País, 14 de febrero del 2008) sobre la inevitable necesidad de incluir valores éticos y filosóficos ante el problema del cambio climático global:

> «Un día, un científico del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (formado por más de 2000 expertos) me contó una historia que me parece que viene muy al caso. Me dijo que cuando el panel empezó a reunirse, hace ya unos 20 años, había en el grupo un anciano científico japonés que en una de las reuniones intervino y dijo: 'los científicos hemos constatado que existe un problema de emisiones, pero no lo podemos resolver. Puesto que el CO2 lo producen las máquinas, tendremos que llamar a los ingenieros. Éstos, a su vez, dirán que existe la tecnología necesaria para solucionar el problema, pero que cuesta dinero, así que se llamará a los economistas. Los economistas harán sus cálculos y dirán que, para conseguirlo, habrá que cambiar nuestro actual modelo social basado en el transporte, el derroche energético... así que se llamará a los sociólogos. Éstos, a su vez, dirán que es un problema de escala de valores que ellos no pueden resolver, así que se acudirá a los filósofos para que nos digan en qué valores deberíamos poner nuestro empeño e interés.»

5-.Un Programa Minimalista para vivir en un Mundo de Sistemas Complejos

Para concluir este artículo, y recordando lo expuesto en otros lugares (Ayestarán, 2008), hemos de tener en cuenta que el Sistema Tierra se ha visto afectado por el proceso de globalización, y que deberíamos invertir el sentido de algunos de los efectos perversos y nocivos de la crisis global ante la que nos vemos expuestos. Los seres humanos, mujeres y hombres, no deberíamos usar

lo global (teletecnologías mundiales) para explotar lo real (materias primas, recursos ambientales) para obtener lo virtual (especulación financiera). Debemos usar lo virtual (matemáticas, software, bioinformática, Internet) para medir lo real (biogeoquímico-físico) para obtener lo global (economía ecológica y ecología humana en el Sistema Tierra). Esta transmutación de valores epistémicos, ontológicos y éticos entre lo global, lo real y lo virtual en el Sistema Tierra requiere un nuevo planteamiento de una auténtica ciencia de la sostenibilidad global.

Por otro lado, la transdisciplinariedad filosófica y metodológica que implica una ciencia de la sostenibilidad global e integral debería inspirarse en una forma de investigación abierta a la complejidad a través de un nuevo programa minimalista de los sistemas complejos con tres principios interrelacionados básicos: un principio epistémico, un principio ontológico y un principio ético:

1- *Epistemología de la complejidad sistémica o principio de Heráclito:* el pensador de Éfeso ya nos dejó la máxima que enuncia este principio en el fragmento 41 (según la numeración Diels-Kranz) y que nos transmitió *Diógenes Laercio: "una sola cosa es lo sabio, conocer la Razón (Logos), por la cual todas las cosas son gobernadas por medio de todas"*. Heráclito era consciente de que la realidad de la physis (o natura) amaba esconderse en su complejidad y que sólo se puede comprender dicha realidad con un saber donde se estudie el sistema de las cosas a través del conocimiento de las oposiciones y diferencias que generan incesantemente todas las cosas. Una epistemología que no siga este principio siempre será reduccionista y parcial.

2- *Ontología de la complejidad sistémica o principio de Pascal:* la complejidad de los sistemas conlleva una ontología sistémica donde la interacción entre las partes, así como la interacción entre las partes y el todo, aportan el modelo adecuado de la realidad, en un juego dinámico de elementos causados y causantes. Este principio fue formulado por Pascal en sus Pensamientos (Pascal 1981, p. 80), diciendo: *"por lo tanto, siendo todas las cosas causadas y causantes, ayudadas y ayudantes, mediatas e inmediatas, y manteniéndose todas por un lazo natural e insensible que liga las más alejadas y las más diferentes, tengo por imposible conocer las partes sin conocer el todo, así como conocer el todo sin conocer particularmen-*

te las partes". Una ontología que no siga este principio siempre será sectorial y limitada.

3- *Ética de la complejidad sistémica o principio de Morin:* debemos a Edgar Morin este principio emanado de la ecología de la acción (Morin 2005, 2006), que indica que toda acción escapa cada vez más a la voluntad de su autor a medida que entra en el juego de las interacciones y retroacciones del medio en el que interviene, es decir, los efectos de una acción dependen no sólo de las intenciones del agente, sino también de las condiciones propias del medio en el que tiene lugar. En un contexto de complejidad el sentido de una acción puede verse desviado, invertido o incluso pervertido, introduciendo la incertidumbre y la contradicción en la ética, porque ya no es cierto que la pureza de los medios conduzca a los fines deseados, ni tampoco que su impureza sea inevitablemente nefasta. La ética de la complejidad debe analizar adecuadamente los fines y los medios en los sistemas complejos, y cuando aquí se dice medio también hay que incluir el medio (ambiente) global, el Sistema Tierra en toda su complejidad. Es una ética abiertamente expuesta, por otro lado, a la contradicción posible y a la incertidumbre inevitable, aunque no por ello alejada de la responsabilidad. Una ética que no siga este principio podrá ser bienintencionada, pero siempre será ciega y espuria.

Los tres principios constituyen un programa mínimo para afrontar el cambio global y la complejidad en este siglo XXI, donde la ciencia de la sostenibilidad se convierte en el arte de la vida. Una epistemología naturalizada y extendida de las oposiciones y diferencias en conexión (principio epistémico de Heráclito), una ontología ampliada de las interacciones sistémicas emergentes (principio ontológico de Pascal) y una ética renovada de la relación fines-medios en la ecología de la acción (principio ético de Morin) son ingredientes básicos para esta generación y las próximas generaciones, tanto de nuestra especie como de las especies restantes en este planeta. El futuro sólo se dirime desde este paradigma onto-epistémico y ético de la complejidad transdisciplinar, porque el siglo XXI será sostenible o no será.

Referencias

Ayestarán, Ignacio: «De la historia y la sociología ambientales a la ecología política: factores tecnocientíficos, sociohistóricos y ecosistémicos en la investigación sobre el cambio climático», *Norba. Revista de Historia*, 17 (2004): 111-134.

— «The second Copernican revolution in the Anthropocene: an overview», *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 3 (2008): 145-157.

— «Sostenibilidad, crisis ambiental y responsabilidad social de las empresas en la sociedad del conocimiento y del riesgo global», *Filosofía en un mundo global*. Ignacio Ayestarán, Xabier Insausti y Rafael Águila Ruiz (eds.). Barcelona: Anthropos, 2008. 157-168.

Ayestarán, Ignacio; Xabier Insausti y Rafael Águila, (eds.): *Filosofía en un mundo global,* Barcelona: Anthropos, 2008.

Bindé, Jérôme (coord.): *¿Adónde van los valores?: coloquios del siglo XXI*, Barcelona: UNESCO - Icaria, 2005.

Cilliers, Paul: *Complexity and Postmodernism: Understanding Complex Systems*, Londres: Routledge, 1998.

Clark, William C.; Paul J. Crutzen y Hans Joachim Schellnhuber: *Science for global sustainability. Toward a new paradigm*, Earth System Analysis for Sustainability. Hans Joachim Schellnhuber, Paul J. Crutzen, William C. Clark, Martin Claussen y Hermann Held (eds.). Cambridge, Mass., & Londres: The Massachusetts Institute of Technology Press & Dahlem University Press, 2004. 1-25.

Costanza, Robert; Lisa J. Graumlich y Will Steffen: «Sustainability or Collapse? An Integrated History and Future of People on Earth», Report on the 96st Dahlem Workshop. Cambridge, Mass., y Londres: *The Massachusetts Institute of Technology Press & Dahlem University Press*, 2007.

Duarte, Carlos M. et al.: «Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra», Madrid: Centro Superior de Investigaciones Científicas, 2006.

Gallopín, Gilberto; Silvio O. Funtowicz; Martin O'Connor y Jerome Ravetz: «Science for the twenty-first century: from social contract to the scientific core», *International Social Science Journal*, 53, 168 (2001) : 219-229.

García Calvo, Agustín: *Razón común*, Edición crítica, ordenación, traducción y comentario de los restos del libro de Heráclito. Madrid: Lucina, 1985.

García, Rolando: «Conceptos básicos para el estudio de sistemas complejos», *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo*, Enrique Leff (comp.), México: Siglo XXI, 2000. 381-409.

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

García, Rolando et al.: «Nature Pleads not Guilty». *Drought and Man* vol.1 Londres: Pergamon Press, 1981.

Leff, Enrique (comp.): *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo*. México: Siglo XXI, 2000.

Mondolfo, Rodolfo: *Heráclito. Textos y problemas de su interpretación*, México: Siglo XXI, 1971.

Moore III, Berrien; Arild Underdal, Peter Lemke, y Michel Loreau: «The Amsterdam declaration on global change», *Challenges of a Changing Earth*, Will Steffen, Jill Jäger, David J. Carson y Clare Bradshaw (eds.), Berlín: Springer-Verlag, 2002. 207-208.

Morin, Edgar: «La ética de la complejidad y el problema de los valores en el siglo XXI», *¿Adónde van los valores?: coloquios del siglo XXI*, J. Bindé (coord.). Barcelona: UNESCO - Icaria, 2005. 85-89.

— *El método*: vol. 6, Ética. Madrid: Cátedra, 2006.

Novo, María: *El desarrollo sostenible. Su dimensión ambiental y educativa*. Madrid: Pearson Educación, 2006.

Pascal, Blas: *Pensamientos*, Madrid: Alianza Editorial, 1981.

Schellnhuber, Hans Joachim; Paul J. Crutzen; William C. Clark; Martin Claussen, y Hermann Held (eds.): «Earth System Analysis for Sustainability», Report on the 91st Dahlem Workshop. Cambridge, Mass., y Londres: *The Massachusetts Institute of Technology Press & Dahlem University Press*, 2004.

Schellnhuber, Hans Joachim; Paul J. Crutzen, William C. Clark, y Julian Hunt: «Earth system analysis for sustainability», *Environment*, 47.8 (2005): 10-25.

Schellnhuber, Hans Joachim y Dork Sahagian: «The twenty-three GAIM questions», *Global Change Newsletter*, 49 (2002): 20-21.

Steffen, Will; Jill Jäger; David J. Carson y Clare Bradshaw (eds.): *Challenges of a Changing Earth*, Berlín: Springer-Verlag, 2002.

Worldwatch Institute: *El mundo ante el calentamiento global. La situación del mundo - 2009*. Barcelona: Fuhem-CIP e Icaria, 2009.

COMPLEXUS
Revista de Complejidad, Ciencia y Estética

MÁS LECCIONES A PARTIR DE LA COMPLEJIDAD. UNA PARÁBOLA PERENNE Y ACASO URGENTE EN LA TEORÍA DEL CAOS

Carlos E. Puente

Department of Land, Air and Water Resources
University of California, Davis
Davis, CA 95616, Estados Unidos
cepuente@ucdavis.edu

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

MÁS LECCIONES A PARTIR DE LA COMPLEJIDAD. UNA PARÁBOLA PERENNE Y ACASO URGENTE EN LA TEORÍA DEL CAOS

Carlos E. Puente

Department of Land, Air and Water Resources
University of California, Davis
Davis, CA 95616, Estados Unidos
cepuente@ucdavis.edu

Resumen

Las últimas décadas han sido testigo del desarrollo de una colección de ideas encaminadas a entender y predecir la ubicua complejidad de la naturaleza. Este artículo explica cómo dicho trabajo provee, a partir de su estudio detallado del orden y el desorden, un marco de referencia imparcial que permite visualizar la dinámica y las consecuencias de los rasgos divisivos que siempre han estado presentes en la humanidad. Específicamente, este trabajo muestra cómo resultados recientes y universales, acerca de la transición del orden al caos mediante una cascada de bifurcaciones, proveen una invitación parabólica y antigua a un estado sereno, simbolizado por la convergencia al origen en la raíz del árbol caótico de Feigenbaum, en el cual podemos lograr la paz que deseamos. Se explica cómo dicha convergencia se torna urgente dada la conexión de dicho árbol moderno con otras higueras antiguas igualmente simbólicas.

Palabras clave: ***caos, complejidad, lecciones, parábolas, paz***

1. Introducción

Desde tiempo inmemorial, el estado de confusión que denominamos 'caos' ha estado presente en la historia de la humanidad. Hoy por hoy, diversas manifestaciones de tal estado desordenado y aleatorio continúan latentes en guerras y rumores de guerras, holocaustos, epidemias y pandemias, terrorismo, corrupción, hambrunas, caídas de las bolsas de valores, uso de drogas y pobreza extrema: su presencia claramente rasga el tapiz de la unidad e impide el florecimiento de una paz genuina en el mundo.[1]

En las últimas décadas se ha descubierto diversas rutas del orden hacia el caos, y entre ellas ocupa un lugar de prominencia la definida mediante una cascada de bifurcaciones.[2-4] Dicha ruta es particularmente célebre por la sencillez inherente de las ideas y por la aplicabilidad de las nociones en una variedad de disciplinas que abarcan la ecología, la ingeniería, la química y la física. Tal y como se repasa en este artículo, diversas cascadas de bifurcaciones dan lugar a diagramas exóticos, con propiedades universales y con forma de árbol, que expresan la transición coherente del 'orden' al 'desorden' y que permiten comprender la dinámica elusiva del calentamiento de un fluido (es decir, convección) desde su estado pacífico de quietud hasta una condición turbulenta y caótica cuando el calor agregado al fluido es excesivo.

Este artículo explora las propiedades universales de los árboles caóticos y en particular del árbol icónico definido a partir de la parábola logística y en honor a Mitchell Feigenbaum, es decir, el árbol de Feigenbaum o, traducido del alemán, el árbol de la higuera, para mostrar, por analogía y tal y como se hizo antes a partir de cascadas multiplicativas y la turbulencia natural,5 que en efecto existe un único estado, en la raíz de dichos árboles, en donde nosotros como seres humanos podemos hallar la paz que anhelamos.

La organización de este trabajo es como sigue:

Primero se repasa la dinámica de la parábola logística. Luego, se introduce el árbol de Feigenbaum conjuntamente con algunas de sus propiedades universales más importantes. Después se muestra cómo las ideas son relevantes para modelar la convección. Luego, se explica cómo la teoría del caos provee una parábola certera y antigua hacia la paz en la raíz de dicho árbol. Y finalmente, se resume el trabajo por medio de una poesía-canción.

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

2. La Dinámica de la Parábola Logística

La ecuación prototípica empleada para explicar el caos es aquella que define la parábola logística, $X_{k+1} = \alpha\ X_k\ (1 - X_k)$. Aquí, X_k denota el tamaño (normalizado entre 0 y 1) de una población (digamos, conejos) en la generación k, α es un parámetro que varía entre 0 y 4 incluidos, y la expresión dicta lo que ocurre de una generación a la siguiente.

En la Figura 1 se observa la evolución de una población regida por dicha expresión cuando α es igual a 2.8. Como se observa, de un valor inicial pequeño X_0, y siguiendo sucesivamente las líneas verticales y horizontales hasta la recta X = Y, se llega, en este caso, a un único punto fijo X_∞, que corresponde a la intersección no nula entre la recta y la parábola.

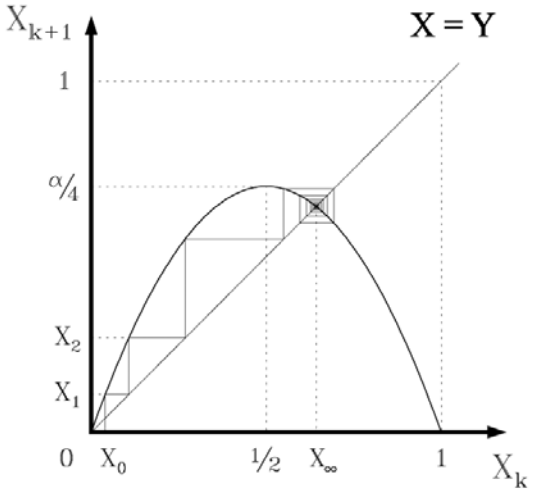


Figura 1. La parábola logística y la convergencia a un punto fijo.

Tal y como es bien conocido, X_∞ depende exquisitamente de α. A continuación se repasan los diversos estados que define la simple ecuación cuadrática cuando el pico de la parábola aumenta progresivamente.

Cuando la parábola está debajo de la recta, es decir, cuando $\alpha \leq 1$ como en la Figura 2, X_∞ converge a cero, y esto sucede pues la pendiente de la parábola en el origen al ser menor que la de la recta atrae cualquier población. Cuando la parábola pasa el umbral uno a uno X = Y, como en la Figura 1, la pendiente

de la parábola en el origen es mayor que uno, y entonces la dinámica ya no llega a cero, pues el origen repele. Si α está entre 1 y 3, la reiteración de la ecuación logística converge a la intersección no nula entre la parábola y la recta dada por $X_\infty = (\alpha - 1)/\alpha$, como en la Figura 1.

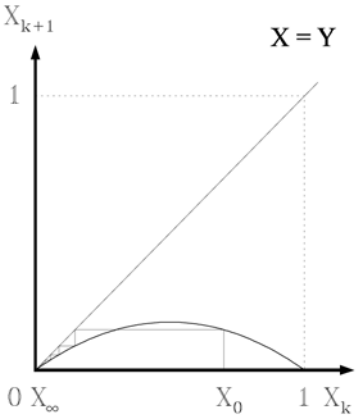


Figura 2. Convergencia al origen

Si α aumenta más allá de 3, lo que le ocurrió al origen también le sucede a la intersección no nula entre la recta y la parábola, y dicho comportamiento repele. Ahora la dinámica genera oscilaciones estables, primero de dos en dos hasta otro umbral, luego de cuatro en cuatro hasta otro umbral mayor y así sucesivamente, en una cadena de bifurcaciones, tal y como se ilustra en la Figura 3 para valores de α de 3.2 y 3.46 respectivamente.

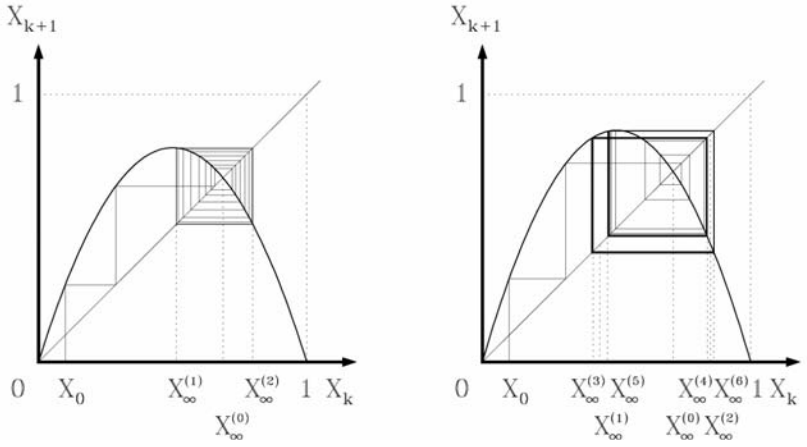


Figura 3. Convergencia a ciclos repetidos cada 2 y cada 4 generaciones

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

Un número infinito de bifurcaciones ocurre, en potencias de 2, al aumentar α, y se traspasa una infinidad de umbrales hasta un valor $\alpha_\infty = 3.5699\ldots$ Allí la dinámica está atraída por un conjunto infinito y carente de cohesión (es decir, como el polvo cantoriano) llamado 'el atrayente de Feigenbaum', cuyo histograma, mostrado en la Figura 4, tiene una estructura multifractal 'espinosa', similar a la encontrada al combinar cascadas multiplicativas clásicas, tal y como se emplea para modelar la turbulencia atmosférica.[5]

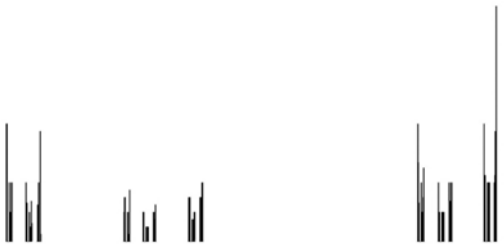


Figura 4. Histograma espinoso del atrayente infinito hallado cuando $\alpha = \alpha_\infty$

Cuando α excede α_∞, se encuentran a veces oscilaciones estables como en la Figura 5, para valores de α iguales a 3.74 y 3.83, pero más comúnmente comportamientos infinitos no repetitivos y sujetos a variaciones extremas a condiciones iniciales como en la Figura 6, para valores de α de 3.6 y 4.

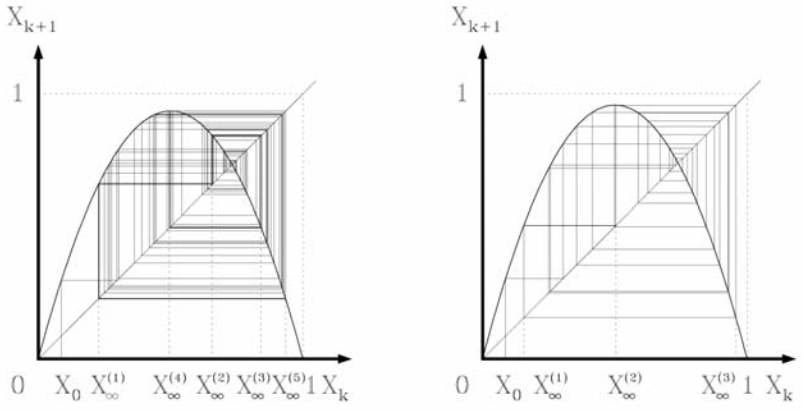


Figura 5. Convergencia a ciclos repetidos cada 5 y cada 3 generaciones

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

Resulta ser cierto que existen valores de α mayores que α_∞ para los cuales la población se repite exactamente cada *n* generaciones para cualquier número *n* que no es una potencia de 2. Pero, entretejida en esta increíble repetitividad arbitraria, existen muchísimos valores del parámetro α para los cuales la población no se repite, sino que vaga para siempre en un atrayente extraño infinito conformado por puntos que no se tocan y que definen el bien denominado comportamiento 'caótico'

Los casos infinitos y a la vez estables también están caracterizados por su sensibilidad extrema a las condiciones iniciales, pues el empezar la dinámica caótica en dos poblaciones arbitrariamente cercanas da lugar a divergencias exponenciales, aunque deterministas, dentro del mismo atrayente extraño. Éste es el imperdonable y famoso efecto mariposa que explica cómo un pequeño error, no importa cuán pequeño, impide el que podamos predecir con exactitud la evolución de una población caótica.

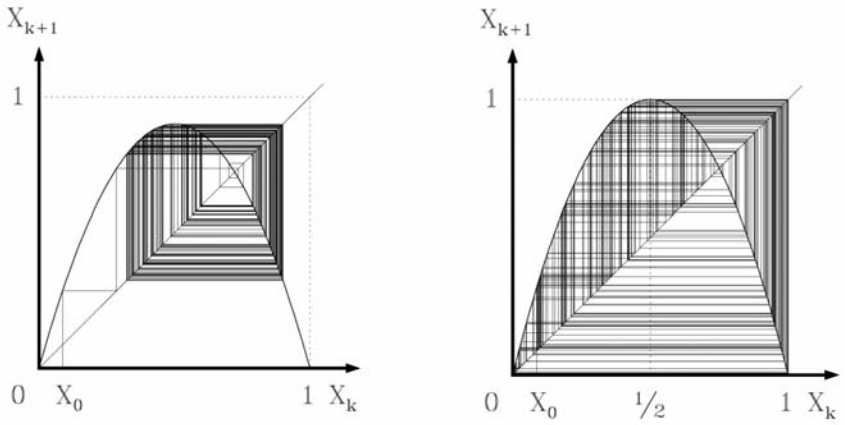


Figura 6. Convergencia a atrayentes extraños no repetitivos

3. El Árbol de Feigenbaum

La Figura 7 resume el increíble comportamiento de la sencilla parábola logística. Éste es el famoso diagrama de las bifurcaciones, o el árbol de Feigenbaum, si se rota 90 grados

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

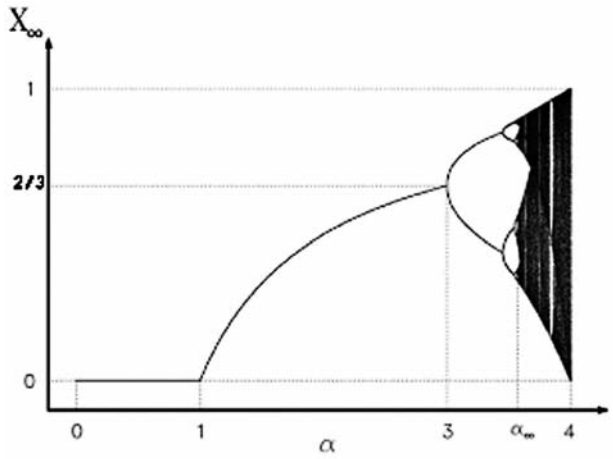


Figura 7. El árbol de bifurcaciones para la parábola logística.

El variar α tiene profundas implicaciones y da lugar a una raíz recta, una rama 'tierna', ramas de bifurcaciones, y de una manera entrelazada, ramas periódicas junto al follaje no-repetitivo y, por ende no cohesivo y polvoriento del caos.

Tal y como puede apreciarse mejor en la Figura 8, en el árbol caótico de la higuera es eso lo que quiere decir Feigenbaum en alemán tal y como se afirmó anteriormente; en efecto, contiene oscilaciones que terminan abarcando, en una infinidad de franjas blancas y en las potencias de 2 previas, todos los números.

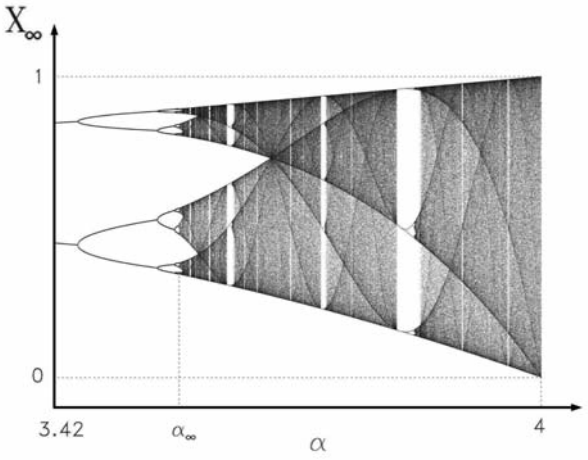


Figura 8. La cola del diagrama de bifurcaciones para la parábola logística.

Esto se puede apreciar aún más magnificando el brote del medio en la Figura 8 correspondiente al período 3, el cual produce una copia reducida de todo el diagrama, como se muestra en la Figura 9.

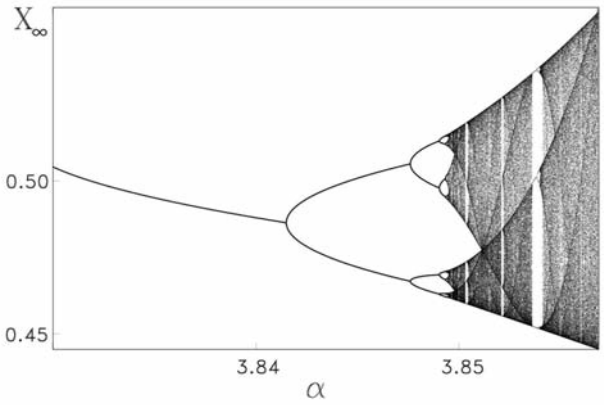


Figura 9. El brote en el árbol de bifurcaciones a partir del valor medio del período 3.

Este árbol reducido no sólo exhibe las bifurcaciones en potencias de 2 antes descritas, sino que contiene franjas blancas similares que definen (al sucederse también en otros brotes ad infinitum) valores de los parámetros en los cuales la dinámica es periódica para cualquier período, y todo esto de acuerdo al célebre orden de Sharkovskii.[6]

Dado que todo árbol reducido también incluye ramas de bifurcaciones similares a las encontradas al principio del diagrama, el árbol de Feigenbaum contiene una infinidad de espinas multifractales similares a las que se describieron en la Figura 4. Así, puede afirmarse que el follaje del árbol está compuesto por ramas periódicas, espinas y polvo.

El célebre diagrama en la Figura 7 se conoce como el árbol de Feigenbaum en virtud a los descubrimientos asombrosos hechos por Mitchell Feigenbaum7, tal y como se explica en la Figura 10. Él encontró que las bifurcaciones sucesivas exhiben un orden universal, tanto en las duraciones de las mismas entre umbral y umbral, Δ_n, y las distancias de una rama a la más cercana a partir de una línea que cruza todas las bifurcaciones, d_n.

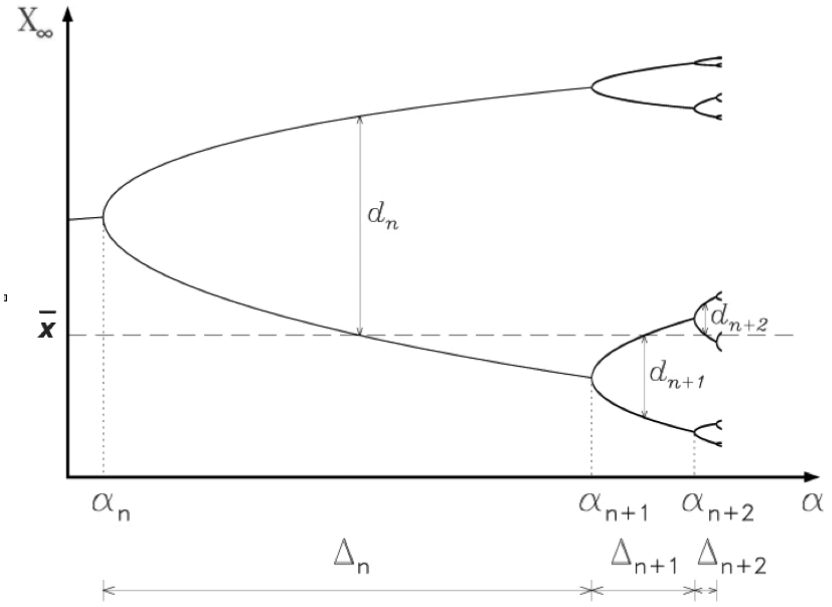


Figura 10. Bifurcaciones sucesivas ∝ = ½ para las primeras bifurcaciones en la parábola logística.

Específicamente, Feigenbaum mostró que el cociente sucesivo de dichas cantidades converge a los números universales $d_n/d_{n+1} \rightarrow F_1 \approx -2.503$ y $\Delta_n/\Delta_{n+1} \rightarrow F_2 \approx 4.669$ y esto resulta ser cierto no sólo para la parábola logística al principio del diagrama de las bifurcaciones, sino para cualquiera de los infinitos brotes dentro del árbol.

Aunque Feigenbaum no descubrió el diagrama de las bifurcaciones, fue él quien encontró que existía un orden en el camino del orden al caos mediante una cadena de bifurcaciones arbitraria, pues las constantes universales de Feigenbaum F_1 y F_2 no sólo son válidas para la ecuación logística sino que lo son también para una infinidad de ecuaciones que tienen un pico, tal y como se ilustra en la Figura 10 para las ecuaciones sencillas, de izquierda a derecha, $X_{k+1} = \alpha\ X_k\ (1 - X_k^3)$ y $X_{k+1} = \alpha\ X_k\ (1 - X_k)^3$.

Tal y como se explicó para la parábola logística, estas higueras tienen una raíz recta, una rama esbelta que surge al pasar el primer umbral X = Y, una secuencia de ramas que reflejan las bifurcaciones y umbrales sucesivos y, arriba en el árbol y de una manera entrelazada, muchísimas ramas periódicas que generan espinas al final de todas las franjas blancas, y, aún más comúnmente, el follaje polvoriento del caos.

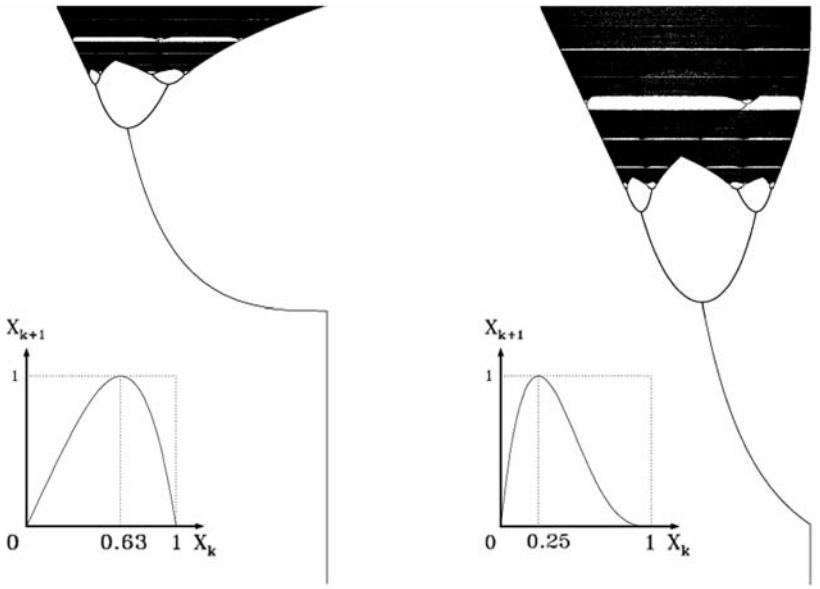


Figura 11. Higueras para dos ecuaciones no lineales sencillas.

Notablemente, todos los brotes infinitos de ramas a hojas polvorientas en estos y muchos más árboles caóticos suceden de acuerdo a las mismas constantes F_1 y F_2, y todo esto es cierto para sus infinitos árboles reducidos.

4. Una Aplicación Relevante del Caos en la Física

Dentro de los descubrimientos prácticos más pertinentes de la Teoría del Caos se encuentra su conexión con el calentamiento de fluidos, y en particular con la forma ordenada mediante la cual el proceso convectivo transforma un fluido desde un estado de quietud hasta uno eminentemente turbulento y caótico. Tal y como fue encontrado experimentalmente para el helio líquido, en la medida en que se le agrega calor al fluido, éste cambia de estado de acuerdo a las bifurcaciones del árbol de Feigenbaum, y lo hace en aumentos de temperatura que son acordes a la constante F_2, hasta donde es posible hacer las observaciones del caso[8].

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

Estos resultados sencillos e inesperados, y otros relacionados con otros sistemas tanto físicos como relativos a otras disciplinas[9-10], ayudaron a validar la teoría y establecieron la posibilidad de comprender la dinámica de diversos procesos en términos de un parámetro que, como α en la ecuación logística y el calor en la convección, termina representando la esencia del sistema. Ciertamente, los resultados continúan siendo sorprendentes, porque en el estudio de diversos sistemas complejos se esperaría la necesidad de emplear ecuaciones diferenciales complicadas y no representaciones discretas, y porque el empleo de dichas nociones resulta en un paradigma particularmente sencillo y no dependiente del concepto del azar para intentar entender la complejidad natural.

5. ¿Caos o no Caos? Una Pregunta de Paz

Al ponderar las bellas ideas que dan lugar al caos mediante una cascada de bifurcaciones, es sensible considerar los mecanismos sencillos y universales allí presentes para dilucidar, al menos parabólicamente, cómo evitar la violencia turbulenta que experimentamos en nuestras vidas[5], en especial cuando estamos rodeados de un 'calor' excesivo que nos lleva a un estado de vida 'caótico'.

Después de todo, y de una manera proverbial, el nivel de calor por medio del cual vivimos, es decir el parámetro genérico α que define nuestra parábola, determina nuestra logística esencial. Pues α determina nuestra dinámica ordenada o desordenada, nuestra elección de lo sencillo o de lo complejo y nuestro subsecuente estado de atracción a la serenidad y la paz o al desasosiego y la turbulencia.

Como el calor α en efecto define el estado final del proceso, podemos comprender que es sabio el mantenerlo pequeño ($\alpha \leq 1$), tanto en el mundo como dentro de nosotros mismos, para evitar amplificarlo desproporcionalmente de generación en generación y así evadir las no-linealidades que nos alejan de la esencia, es decir, que nos llevan a crecer espinas y a 'morder el polvo'. Pues a pesar de que las higueras exhiben un orden en su camino hacia el desorden,

podemos apreciar en los brincos insulsos, en los atrayentes extraños, y también en aquellos periódicos o aún en un punto fijo positivo, la ansiosa y tonta frustración que muchas veces experimentamos, y tantas veces de una forma determinista, engreída y predecible, cuando, al escoger vivir con afán, viajamos de sitio en sitio y acaloradamente sin encontrar la raíz.

En este espíritu, la mejor solución, para cada uno de nosotros y para el mundo en general, es el reducirle el ritmo a la vida, bajándonos del árbol como simbólica y literalmente lo hizo un pequeño hombre enmendando su camino al oír un fiel llamado11, de modo que al bajar debajo del umbral primario, esto es la recta X = Y, podamos vivir sin turbulencia, sin caos, y en verdadera mansedumbre en el estado robusto simbolizado por $X_{\infty}= 0$. Pues existe una marcada diferencia entre una condición aparentemente laminar como ocurre en las llamadas 'bifurcaciones tangenciales' y el vivir verdaderamente en paz, pues no hay cómo escaparse por la tangente cuando nuestras acciones contienen estallidos caóticos carentes de paz y llenos de intermitencia[3].

Como converger al origen resulta ser el único estado deseado, es decir, el estar sujetos a la raíz mansa de la higuera y protegidos por el umbral X = Y, y como esto significa no la ruina al perder todos nuestros 'conejos', sino que engendra nuestra riqueza al abandonarnos a vivir confiando en la vida, viviendo a números de Reynolds bajos, de modo que podamos comunicarnos, es pertinente notar que dicha condición puede lograrse también cuando el peor de los caos nos rodea.

Tal y como lo ilustra la Figura 12, cuando $\alpha = 4$, es decir cuando el parámetro es máximo y el calor es "infernal," existen caminos que evitan vagar para siempre. Éstas son las pre imágenes del cero, construidas empleando la parábola logística en reversa y dando lugar a un diagrama binario, que en su dinámica precisa siguen una extremamente delicada rayuela, y encuentran el punto medio que las lleva a retornar a la raíz; también dibujan, curiosamente, en dos rotaciones (abajo a arriba e izquierda a derecha) el mismo símbolo de la raíz, ahora cuadrada.[5]

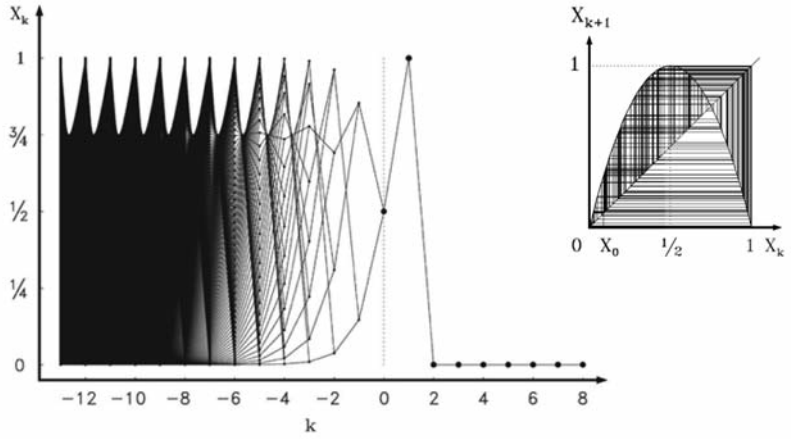


Figura 12. Orbitas de la parábola logística, $\alpha = 4$, que terminan en el cero.

Pues aunque el pasado parezca lucir casi igual en virtud a lo exquisitamente entrelazados que están los diversos casos en la plenitud del caos, es trágico terminar oscilando para siempre tal y como lo muestra la Figura 13 cada tres generaciones, o cada número arbitrario de generaciones que da lugar a otros diagramas binarios que evitan el atrayente extraño.

Y es que resulta ser más trágico aún, si la tragedia pudiese ser cuantificable, el pasar arbitrariamente cerca del punto medio y perderse entrar por él, tal y como lo muestra la Figura 14. Pues el efecto mariposa, con toda probabilidad y aunque parezca brindarnos la opción de visitar todos los espacios, nos deja irremediablemente atrapados en un atrayente extraño, vacío, polvoriento e incompleto que desafortunadamente no incluye la paz, dado que no contiene ni al origen ni a sus pre imágenes infinitamente contables.

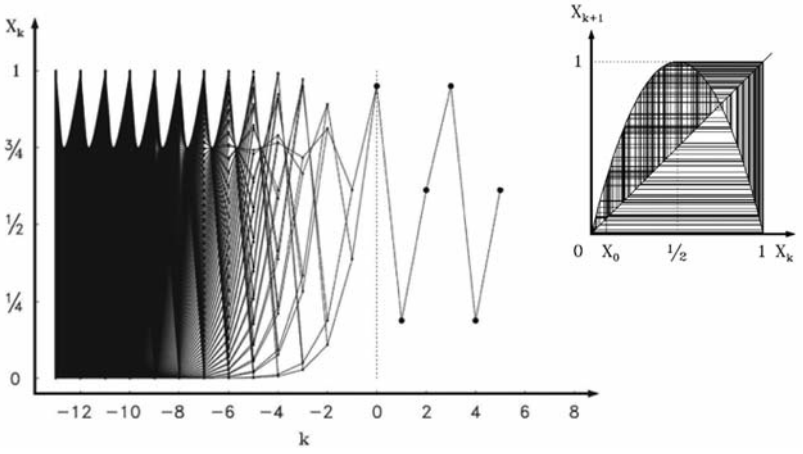


Figura 13. Orbitas de la parábola logística, $\alpha = 4$,que terminan en un ciclo que se repite cada 3 generaciones.

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

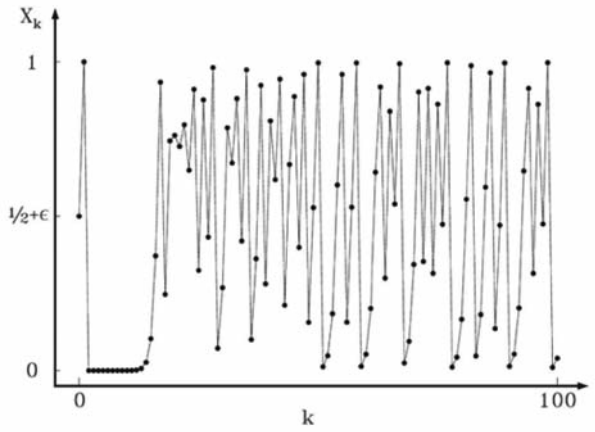


Figura 14. Orbitas de la parábola logística, $\alpha = 4$, a partir de $X_0 = ½ + \varepsilon$, $\varepsilon = 0.00001$.

Al final, la ciencia moderna de la complejidad nos permite visualizar nuestras opciones antiguas y reitera que siempre es mejor, independientemente de donde estemos, vivir serenamente, en paz, de una manera simple y escogiendo de veras abandonarnos a la raíz que es el amor. Pues nadie llega al origen sino abandonándose al umbral X = Y, que nos protege de las espinas divisivas y del polvo mortífero que caracterizan el caos y su turbulencia. Pues no hay fruto dulce alguno en el diagrama sino en la raíz.

Las ideas aquí expuestas no sólo recuerdan enseñanzas antiguas y llenas de sentido común sino también parábolas misteriosas acerca de higueras simbólicas. Nuestros primeros padres, al morder el polvo se cubrieron con las hojas de una higuera12, y aquí dichas hojas son coherentes con su edicto de muerte. Quien dijo ser el umbral y camino maldijo a una higuera alegórica por no tener fruto y la secó hasta la raíz13, y aquí sólo la raíz recibe su paz al estar ligada con el origen. Y él habló acerca de su retorno, feliz para algunos y terrible para otros, mediante diversas señales caóticas y una higuera parabólica con rama tierna y brotes, y también otros árboles14, y aquí despuntaron tres tales y existen muchos más.

Claro está, proponer fechas de eventos cósmicos y escatológicos no es posible, pero lo que se infiere de estas reflexiones es una invitación, acaso inesperada por provenir de la ciencia, hacia la paz, el origen, la raíz, lo recto, y en resumen al amor. Para concluir, a continuación se incluye la letra de una poesía-canción acaso urgente.

En medio del caos

Es mejor llegar al origen...

En la ciencia moderna
hay un árbol católico,
con raíz sempiterna
y un follaje caótico.

Este icono refleja
la simpleza del meollo,
y poderoso define
la salida del embrollo.

Oye amigo comprende
fiel aviso de la higuera:
el que se crea valiente
va a llorar su ceguera.

Oye bien santo consejo
el ya bajarse es prudente:
es vital hallar lo recto
para ganar toda suerte.

Y entiende que...

En medio del caos
hay una salida
que lleva a la vida.

En medio del caos
se halla una guarida
que sana la herida.
En lo alto de la higuera
hay un caminito
que va al infinito.

En lo alto de la higuera
se halla un puntito
que lo une todito.

En medio del caos
hay una rayuela
que brincas sin pena.

En medio del caos
se halla un omega
que nutre y libera.

En lo alto de la higuera
hay un pozo fino
que riega el destino.

En lo alto de la higuera
se halla un amigo
que da lo divino.

En medio del caos
mira allí está,
en medio del caos
todita verdad,
en medio del caos

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

una puerta abierta,
en medio del caos
que lleva a la esencia,
en medio del caos
con todo equilibrio,
en medio del caos
se evita el peligro,
en medio del caos
caminando recto,
en medio del caos
se halla lo cierto.

En lo alto de la higuera
ve que no invento,
en lo alto de la higuera
un oasis muy bello,
en lo alto de la higuera
hay un trigo bueno,
en lo alto de la higuera
rodeado de maleza,
en lo alto de la higuera
hay un ojo de aguja,
en lo alto de la higuera
que pasas y cura,
en lo alto de la higuera
te bajas, sonríes,
en lo alto de la higuera
y llegas al origen.

En medio del caos
con la santa gloria,
en lo alto de la higuera

hallas la victoria,
en medio del caos
escrito en tu pecho,
en lo alto de la higuera
encuentras tu sueño,
en medio del caos
rodeado de la muerte,
en lo alto de la higuera
descubres ser fuerte,
en medio del caos
con el alma clara,
en lo alto de la higuera
no te pasa nada.

En medio del caos
en lo alto de la higuera. (4)

Ve que no miento, no lo dudes...

Ay bájate... (8)

Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a mi esposa Marta como un testimonio adicional de fe, confiado en que, no por azar, llegará un milagro de vida que deberá llamarse como aquel quien creyó solamente al saber que había sido visto por él bajo la higuera.

Notas y obras consultadas

1. Este trabajo es una versión aumentada de C. E. Puente, «More lessons from complexity – The origin: The root of peace», E:CO, 8.3 (2006):115-122; similar a lo presentado en el II Seminario Bienal Internacional acerca de las implicaciones Filosóficas, Epistemológicas y Metodológicas de la Teoría de la Complejidad, La Habana, Cuba (2004).
2. Moon, Francis C.: *Chaotic Vibrations: An Introduction for Applied Scientist and Engineers*, New York: John Wiley & Sons, 1987.
3. Peitgen, Heinz-Otto; Hartmut Jürgens y Dietmar Saupe: *Chaos and Fractals*, New York: Springer Verlag, 1992.
4. McCauley, Joseph L.: *Chaos, Dynamics and Fractals*, Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
5. Puente, Carlos E.: «Lecciones a partir de la complejidad. La hipotenusa el camino de la paz», *Complexus* 1.3: (2005) 32-53.
6. Ott, Edward: *Chaos in Dynamical Systems*, Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
7. Feigenbaum, Mitchell J.: «Quantitative universality for a class of nonlinear transformations», *Journal of Statistical Physics,* 19: (1978), 25-52.
8. Maurer, J. y A. Libchaber: «Rayleigh-Bénard experiment in liquid helium frequency locking and the onset of turbulence», *Journal de Phyiques Lettres*, 40: (1979), 419-423.
9. Bai-lin, Hao: *Chaos*, Singapur: World Scientific, 1984.
10. Cvitanović, Predrag (Ed.), *Universality in Chaos*, Adam Hilger, Bristol: 1989.
11. Zaqueo se bajó de un sicomoro, de la misma familia de la higuera. Su conversión se relata en el Evangelio según San Lucas 19:1-10.
12. Adán y Eva se cubrieron con hojas de la higuera y luego les decretaron espinas y polvo como castigo. Esto se halla en el Libro del Génesis capítulo 3.

13. La inesperada maldición de la higuera se encuentra relatada en dos versiones. Una, a dos tiempos, en el Evangelio según San Marcos 11:12-25 y otra menos comprometedora y más espectacular en el Evangelio según San Mateo 21:18-22.

14. El famoso discurso en el monte de los olivos, incluyendo versiones similares de una lección o parábola de la higuera, se hallan en el Evangelio según San Mateo capítulos 24 y 25, en el Evangelio según San Marcos capítulo 13, y en el Evangelio según San Lucas capítulo 21.

C O M
P L E
X U S

Revista de Complejidad, Ciencia y Estética

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL

Anunziata Elisa Di Salvo

Universidad Pedagógica Experimental Libertador
Maracay, Venezuela
aedisalvo@hotmail.com

FUNDAMENTOS DE LA TERMODINÁMICA DEL NO EQUILIBRIO PARA UN NUEVO SABER AMBIENTAL[1]

Anunziata Elisa Di Salvo

Universidad Pedagógica Experimental Libertador
Maracay, Venezuela
aedisalvo@hotmail.com

Resumen

La problemática ambiental ha sido un tema de debate en diferentes instancias, tanto académicas, como científicas y políticas, y el surgimiento de la misma ha estado indudablemente ligada al desarrollo científico y tecnológico, desarrollo que conllevó a logros materiales cada vez más abundantes y a la obtención de medios más eficientes para satisfacer las necesidades humanas. En este contexto, la educación pasa a ser un elemento clave para el desarrollo de una sensibilidad creciente hacia el ambiente, que conlleve a entender y rediscutir la relación hombre-naturaleza. Sin embargo, desde el hecho educativo es necesario trascender el simple cuestionamiento del comportamiento de la sociedad de la abundancia y del progreso y reclamar la reformulación del paradigma del conocimiento en el que se ha fundamentado la educación ambiental. Desde esta perspectiva, se demanda, entre otras cosas, la reconstrucción del conocimiento, el diálogo y la integración de saberes, aspectos que permitirían trascender la reducción y compartimentalización del conocimiento característico de la ciencia occidental. En este contexto en la presente investigación se realiza una revisión de algunos conceptos de carácter más complejos y sistémicos, los cuales consideramos que sin duda alguna deben incorporarse en pro de un saber ambiental

[1] El presente artículo es una versión revisada de la ponencia de la autora en el 4º Seminario Bienal Internacional acerca de las Implicaciones Filosóficas, Epistemológicas y Metodológicas de la Teoría de la Complejidad, Celebrado en La Habana, Cuba, del 15 al 18 de enero, 2008.

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

completo, coherente y responsable. Entre ellos, destacan los derivados de la Termodinámica del no equilibrio, disciplina que se desplaza del modelo inerte inanimado y se acerca al mundo de lo biológico y ofrece la visión de un mundo diverso, abierto y pluralista. En el estudio de los sistemas lejos del equilibrio, las antiguas leyes de la causalidad aparecen ahora como situaciones limitativas y únicamente aplicables a sistemas idealizados. La ciencia de la complejidad conduce a una concepción completamente diferente. Conceptos como atractores, bifurcación, irreversibilidad y contingencia son sólo algunos de los nuevos elementos que deben ser considerados para interpretar la dinámica de los sistemas naturales.

Palabras clave: ***educación ambiental, bifurcación, complejidad, inestabilidad, termodinámica del no equilibrio, saber ambiental.***

1. Introducción

En la actualidad, la relación hombre-naturaleza se encuentra en revisión desde diversos puntos de vista tales como el filosófico, el ético y el científico; la diferencia está en el énfasis y la intención del autor. La ciencia permite y se quiere intervenir desde una posición armónica y conocente.

La ecología como disciplina científica es una perspectiva a través de la cual se puede estudiar esa relación hombre-natura. En este sentido, encontramos, por ejemplo, la vertiente de la ecología profunda, citada por Capra (1998), la cual reconoce "... la interdependencia fundamental entre todos los fenómenos y el hecho de que, como individuos y como sociedades, estamos inmersos en (y finalmente dependientes de) los procesos cíclicos de la naturaleza" (p. 28). Tenemos entonces, que desde la percepción de la ecología profunda, el hombre no está separado de su entorno natural, y el mundo es considerado como una red de fenómenos fundamentalmente interconectados e interdependientes, y no como

una colección de objetos aislados. El presente trabajo se enmarca en la visión paradigmática de esta vertiente, por lo que se asume la ecología como ciencia compleja con todas las implicaciones que ello conlleva.

Epistemológicamente, la complejidad se refiere a mantener o retener juntas varias partes (Jost, 1998). En este sentido, la ecología no sólo estudia las determinaciones e influencias físicas surgidas del biotopo, o las interacciones entre los diversos seres vivientes que constituyen la biocenosis, sino que se fundamenta como la ciencia de las interacciones organizadoras entre cada uno y todos los constituyentes físicos y vivientes de los ecosistemas. Desde esta perspectiva, encontramos entonces la dinámica de la parte y el todo, la parte que bajo ciertas condiciones inunda al todo y donde el todo así constituido determina la conducta de la parte. Es la heterogeneidad en los vínculos de las partes que da sentido a la identidad versus la segmentación o separación.

Tal como sugiere Heisenberg, citado por Martínez (1993), "el método no puede separarse de su objeto", por lo que entendemos que la termodinámica ofrece un punto de arranque para comprender la complejidad ecológica, al considerarla como aproximación, como una entrevista a lo ecológico, al mundo de las relaciones, como quién aporta instrumentos (especialmente conceptuales) a fin de construir nuevos conceptos de una ciencia de la complejidad que está generándose.

Los sistemas conservativos descritos por la dinámica clásica, como el péndulo ideal de oscilación eterna, la trayectoria de los planetas o las máquinas simples de movimiento perpetuo, simulan un 'ideal' que el sistema dinámico realizará. Las trayectorias dinámicas son deterministas y cada constituyente del sistema no deja de repetir, bajo forma equivalente, un estado inicial (Alegría y Gregory, 1992). Las leyes universales de la dinámica de las trayectorias son de esta manera conservativas, reversibles y deterministas (Prigogine y Stengers, 1990).

La termodinámica, nacida en el siglo XIX, define un sistema no como en dinámica clásica, por la posición y velocidad de sus constituyentes, sino a través de un conjunto de parámetros macroscópicos. Esos parámetros definen la composición del sistema y sus relaciones con el resto del mundo, definido como medio. De esta manera es posible, por medio de las condiciones de contorno,

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

intervenir sobre un sistema ejerciendo una acción mecánica, térmica o química. Ya no se trata, como en dinámica clásica, de observar una evolución y predecirla en función de los efectos de las interacciones entre los elementos de un sistema, sino de actuar sobre el sistema, de prever sus reacciones a una restricción impuesta.

En su evolución, la termodinámica del equilibrio pasa de sistemas cerrados al estado estacionario, y más adelante llega a la concepción de los sistemas fuera del equilibrio, ambos relacionados con sistemas abiertos. De esta manera, nuevas realidades y nuevos fenómenos son observados y admiten transferencia a la conducta biótica. Nos apartamos del mundo predicho y nos acercamos al mundo previsto (Morin, 1986).

En este contexto, para los sistemas biológicos, climáticos, etc., la evolución en el tiempo la asociamos con un incremento de organización y con la aparición de estructuras cada vez más complejas: la evolución no genera estados equivalentes, el futuro no se presenta ya como una repetición del pasado, y las transformaciones que ocurren marcan la irreversibilidad de los procesos en marcha.

En su devenir, la termodinámica abandona los sistemas artificialmente separados del mundo, y en el estudio de los procesos irreversibles descubre que los flujos que atraviesan ciertos sistemas fisicoquímicos que los alejan del equilibrio, pueden alimentar fenómenos de auto-organización espontánea, rupturas de simetría, evoluciones hacia una complejidad y una diversidad crecientes. Estamos ahora más cerca de entender la inestabilidad intrínseca de la naturaleza, en la cual las fluctuaciones insignificantes pueden, si se producen en determinadas circunstancias, invadir todo el sistema, y engendrar un nuevo régimen de funcionamiento y organización.

Desde este punto de vista, podemos afirmar que la termodinámica nos brinda un marco de referencia en el cual insertar el estudio de los fenómenos ecológicos, ya que ofrece instrumentos conceptuales que permiten acercarnos con más detalle a la complejidad de los mismos, pues nos permite prever (en lugar de predecir) la conducta del sistema: nos presenta escenarios posibles de su evolución y abre al análisis una rica variedad de posibilidades.

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

En el presente trabajo se seleccionarán los instrumentos conceptuales que ha elaborado la fisicoquímica, de amplio margen de aplicación y de carácter general, los cuales nos permiten estimar cualitativamente el devenir de los ecosistemas. El propósito central es, por lo tanto, contribuir a la difusión de algunos criterios científicos ante la comunidad educativa, para ayudar a la construcción de una intervención humana más consciente con el ambiente y con la pretensión de que estos conceptos, cruciales para el desarrollo de nuestras sociedades, pasen a formar parte de una cultura general accesible a todos los estratos sociales.

Fundamentos

La acción transformadora que el hombre ha venido realizando sobre el ambiente reviste, en estos momentos, nuevas dimensiones que ponen en evidencia el profundo impacto que la tecnósfera ejerce sobre el planeta.

La dinámica del desarrollo económico ha promovido una relación hombre-naturaleza que conduce al deterioro de los ecosistemas, a la reducción de la biodiversidad, al agotamiento de los recursos naturales y a un aumento de la concentración demográfica en áreas reducidas. Al respecto, Fergusson (1994), señala que el consumismo que se ha imprimido a la sociedad ha terminado por exacerbar la oposición naturaleza-desarrollo económico, la cual nos ha sumido en una profunda crisis ambiental, económica, social, política y ética.

La intervención humana pasa a ser una fuerza geológica de gran dimensión capaz de modificar drásticamente la Tierra. Este inmenso potencial desarrollado, ha dado paso en los últimos años al despertar de una profunda sensibilidad mundial sobre los problemas medioambientales. De una conducta puntual y remedial, se viene desarrollando todo un espacio paradigmático cada vez más profundo que nos está obligando a replantear nuestra relación con la naturaleza.

Esta revisión de la relación hombre-natura necesariamente debe abordar los cambios paradigmáticos que se han gestado en el seno de la misma ciencia. El paradigma científico dominante, que hoy está siendo profundamente cuestionado, ha enarbolado ideas y valores que se han arraigado en nuestra cultura,

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

entre los cuales se pueden mencionar: la visión del universo como un sistema mecánico compuesto de piezas, la vida en sociedad como una lucha competitiva por la supervivencia y la creencia en el progreso material ilimitado a través del crecimiento económico y tecnológico. En esta percepción de la realidad, la ciencia logró implantar premisas que implican una naturaleza inerte y pasiva: por mucho tiempo la naturaleza fue considerada como un autómata manipulable y sujeta a leyes matemáticas que determinan su pasado y su futuro. Sin embargo, nos encontramos en estos momentos ante una situación diferente, pues el cambio que se está produciendo en el seno de la misma ciencia, nos está llevando a renovar nuestro concepto de la relación del hombre con su entorno natural y a que empecemos a concebir la existencia humana enmarcada dentro de una relación dinámica con la naturaleza, lo cual nos permitirá utilizar sus potencialidades e intervenir, dirigir u orientar sus procesos de manera que no vulnere su capacidad autorreguladora, y por ende evolutiva. Esto exige, como plantea Fergusson (o .cit.), considerar a los ecosistemas como unidades integrales de la naturaleza y no sólo como proveedores de recursos materiales para satisfacer nuestras necesidades.

Esta situación obliga a la búsqueda de herramientas conceptuales que permitan abordar el estudio de los sistemas ecológicos bajo una nueva perspectiva. La sensibilidad del sistema a las perturbaciones a las que se somete, la comprensión de las relaciones entre los miembros de los ecosistemas y los procesos interdependientes que se generan en ellos, son fuentes de interrogantes que no podemos dejar de revisar y cuyas respuestas podemos encontrar a partir del pensamiento complejo.

Los conceptos que se derivan de esta nueva visión de interpretar los ecosistemas, implican cambios en la misma base de nuestra cultura, cambios fundamentales que deben involucrar al sistema educativo, ya que éste es el vehículo apropiado para que la información derivada de la ciencia sea incorporada en un marco de conocimiento general desde donde la educación entregue al ciudadano, sujeto de conocimiento, las herramientas conceptuales necesarias para comprender, procesar y utilizar la información, permitiéndole una mejor capacidad de participación en la toma de decisiones tanto individuales como colectivas que

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

afecten a su presente y su futuro. Así será posible el desarrollo de una ciudadanía más informada, activa y responsable en la construcción de una conciencia ecológica-social.

Reflexiones Conceptuales

A raíz del surgimiento de la termodinámica del no equilibrio, encontramos importantes herramientas conceptuales que nos permiten abordar la realidad del mundo que nos rodea desde una perspectiva diferente.

La ciencia clásica nos ofreció la visión de un mundo estable y predecible, descrito por leyes deterministas y reversibles, centrando la atención en la constancia de los fenómenos. El estudio de los sistemas se ha centrado en el equilibrio, en el cual las perturbaciones y/o fluctuaciones que actúan sobre el mismo son amortiguadas (Principio de Le Chatelier) y en el que la evolución del sistema es entendida como repetición de conductas anteriores. Esto nos ha conducido a una visión del mundo en que la conservación se impone a la renovación, frente al cambio, la única respuesta es la permanencia.

La concepción mecanicista de la ciencia clásica nos ofreció la confortable idea de que sabíamos (o al menos podíamos llegar a saber) cuáles eran las causas de los fenómenos que ocurrían. Fue eficaz para explicar fenómenos que funcionan como simples máquinas, mas no para explicar fenómenos como el desarrollo, la evolución de sistemas hacia niveles de complejidad creciente, o cómo pequeñas fluctuaciones en un sistema pueden llegar a generar grandes cambios.

Frente a esta forma de abordar la realidad, la termodinámica del no equilibrio nos ofrece la visión de un mundo diverso, abierto y pluralista. El descubrimiento de estructuras en condiciones de no equilibrio, la inestabilidad de partículas elementales y el hecho de que el universo está en continua expansión, obligan a una reconceptualización que lleva a desmontar la visión del mundo que ofreció el paradigma clásico.

En el estudio de los sistemas lejos del equilibrio, encontramos que las fluctuaciones, en lugar de amortiguarse, se amplifican pudiéndose instalar en el sis-

tema y evolucionando él mismo hacia nuevos estados, es decir, el sistema no regresa a las condiciones reinantes antes del cambio, sino que surgen nuevas estructuras como respuestas a las condiciones dadas.

En el no-equilibrio, la evolución se considera como un proceso que conduce a estructuras más complejas, de orden superior. Esto implica que las leyes de la causalidad aparecen ahora como situaciones limitativas, aplicables únicamente a sistemas idealizados. Actualmente, la ciencia de la complejidad conduce a una concepción completamente diferente, pues nos muestra cómo en lugar de permanecer apresados en un universo cerrado que funciona como un reloj mecánico, nos encontramos en un universo mucho más flexible en el que siempre existe la posibilidad de que alguna inestabilidad conduzca a algún nuevo mecanismo. Tenemos entonces realmente un universo abierto.

La revisión de conceptos fundamentales de la termodinámica del no equilibrio, como atractores, bifurcación, irreversibilidad o contingencia son sólo algunos elementos que debemos tomar en cuenta para interpretar la dinámica de los sistemas ecológicos.

Esta manera de abordar la realidad plantea nuevos caminos que permiten un renovado diálogo con la naturaleza, en la cual la complejidad va directamente unida a la inestabilidad.

Herramientas: Dinámica de Estabilidad e Inestabilidad en los Sistemas Naturales

Los sistemas naturales son sistemas abiertos que intercambian continuamente materia y energía, por lo tanto son sistemas dinámicos en los cuales cualquier factor puede producir cambios en las condiciones existentes.

El estudio de los sistemas abiertos evidencia una gama de conductas que pueden surgir bajo condiciones de no equilibrio, y que se ponen de manifiesto cuando el sistema se encuentra sometido a un vínculo externo que lo mantiene alejado del equilibrio, y su dinámica viene descrita por leyes no lineales. Estos sistemas son afectados por la irreversibilidad, ya que al producirse una fluctuación

o un cambio brusco en el sistema aparecen estructuras emergentes que se adaptan a las nuevas condiciones. Los ecosistemas son vulnerables, ya que son altamente sensibles, pero esta sensibilidad no puede separarse de su flexibilidad; por lo tanto, el ecosistema es capaz de evolucionar ante la irrupción perturbadora de lo nuevo.

La tendencia profunda de los ecosistemas, en el análisis ecológico hasta el momento, es un estado estacionario u homeostático. Pero esta tendencia es solamente ideal en nuestro planeta, pues éste tiene una historia física, geológica, climática profundamente dinámica. En este movimiento los ecosistemas se transforman, se desplazan. Todos los cambios se han efectuado a través de estados estacionarios sucesivos que han surgido a raíz de otros cambios. De este modo, la naturaleza tiende al estado estacionario a la vez que evoluciona.

En esta evolución, hay un aumento de complejidad creciente, la cual viene acompañada de un aumento de orden, desorden y organización (Morin, 1988). Un desarrollo de complejidad no es necesariamente un aumento cualitativo de diversidad, y el desarrollo de la diversidad obedece a principios complejos; es decir, no solamente desde el punto de vista cuantitativo. Sin embargo, es necesaria la diversidad para los ecosistemas, y ésta puede estar unida en ciertas condiciones a la complejidad. La gran diversidad de los constituyentes de un ecosistema constituye un factor de desarrollo de sus cualidades de resistencia a las agresiones y perturbaciones. Ahora bien, esta resistencia puede darse de dos formas diferentes: cuando el ecosistema es capaz de amortiguar la perturbación una vez instalados los perturbadores, o cuando puede restaurar su identidad después de grandes trastornos.

En este sentido Morin (o. cit.), plantea dos aspectos fundamentales para los ecosistemas. El primero establece que las leyes de las organizaciones complejas autoorganizativas no son de equilibrio, sino de desequilibrio, de dinamismo estabilizado; el segundo aspecto, formula que la inteligibilidad del sistema ha de encontrarse no solamente en él mismo, sino también en su relación con el ambiente; además, esta relación no es una simple dependencia, sino que es constitutiva del sistema mismo.

Podemos afirmar entonces que la realidad de la inteligibilidad de los eco-

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

sistemas está tanto en el vínculo como en la distinción entre el sistema abierto y su ambiente. En este sentido, debemos considerar que los ecosistemas:

- Establecen un intercambio con el ambiente.
- Este intercambio es esencial para mantenerse el sistema, ya que del mismo depende su capacidad reproductiva o de continuidad, así como su capacidad de transformación.

Ciclos y Redes

Al basar nuestra atención en los ecosistemas, no debemos olvidar su naturaleza cíclica, ni la interdependencia que se establece entre todos y cada uno de sus miembros, la cual produce una complicada red de relaciones en la que el éxito de la comunidad depende de cada uno de sus individuos y al contrario, el éxito de cada individuo depende de la comunidad como un todo.

Para comprender las interrelaciones que se establecen, es necesario cambiar nuestra percepción y utilizar el análisis del todo, pasar de objetos a relaciones. No podemos llegar a entender la complicada red de relaciones a partir de la clásica visión analítica de descomponer el todo en partes y estudiar desde las partes las propiedades del conjunto. Si aceptamos que los sistemas ecológicos son sistemas complejos, debemos entender que en la complejidad, como sugiere Jost (1998), la sumatoria de las partes no es igual al todo que se pretende conocer o aprehender.

Las cadenas lineales de causa-efecto se dan muy raramente en los ecosistemas. Las relaciones entre los miembros de una comunidad ecológica son no-lineales e incluyen múltiples bucles de retroalimentación. Cualquier perturbación no tendrá un único efecto, sino que sus consecuencias repercutirán en expansión. De hecho, puede amplificarse por circuitos de retroalimentación independiente, capaz de llegar a ocultar la fuente original de la perturbación. Tenemos dos tipos de realimentación: la negativa que regula, y la positiva que amplifica. Las propiedades de la realimentación, sobre todo la renovación constante, confieren al sistema características conocidas en su conjunto como autopoiesis.

Las estructuras autopoiéticas las podemos encontrar en todo un abanico de sistemas abiertos, desde estructuras disipativas químicas, como la reacción BZ, hasta sistemas de gran complejidad como los seres vivos, entre los cuales se encuentran los ecosistemas.

Una característica de los sistemas autopoiéticos es su capacidad de autorregulación, la cual les concede cierta autonomía y les confiere una identidad propia que mantienen continuamente.

Si centramos nuestra atención en los ecosistemas, observamos que éstos (al igual que el resto de las estructuras autopoiéticas) están inmersos en un ambiente que constituye un ámbito alejado del equilibrio constituido por flujos de energía que involucran luz solar, alimento, calor, agentes químicos, etc.. En este contexto, las estructuras autopoiéticas tienen un límite, una frontera definida, pero la cual es abierta y conecta al sistema con el mundo circundante con una extrema complejidad. En esta relación entre sistema y ambiente se produce una realimentación. Tal como lo plantea Lovelock (1993), el planeta mismo es una forma de vida creada por realimentación interconectada. Según su hipótesis de Gaia, las especies de la Tierra están coordinadas de tal modo que nuestro planeta es una gran estructura autopoiética.

Los instrumentos para la autorregulación son muchos, y han evolucionado con el tiempo. Como ejemplo de un autorregulador negativo, tenemos el caso de 'Emilia', plancton oceánico que emite un gas sulfuroso a la atmósfera. Una reacción química transforma el gas en partículas alrededor de las cuales se condensa el agua dando origen a la formación de nubes. Éstas reflejan la luz solar, que de otra manera habrían llegado a la superficie de la Tierra calentándola. Sin embargo, si la temperatura desciende demasiado, el frío reduce la cantidad de plancton y con él la formación de nubes, con lo cual asciende la temperatura. 'Emilia' opera como un termostato para mantener la temperatura terrestre dentro de ciertos límites.

Mantener un proceso dentro de límites de estabilidad dinámica supone por consiguiente una alternancia de retroalimentación positiva y negativa, la cual determina la amplitud de las oscilaciones que se dan en el seno del sistema.

En los ecosistemas, la realimentación no lineal constituye una pieza clave a considerar, ya que la misma puede transformar una actividad simple en una compleja danza de situaciones. En este sentido, la dinámica no lineal que se registra en los ecosistemas no puede ser abordada a partir del estudio de modelos lineales, los cuales son poco confiables para la predicción. Los pronósticos no funcionan, ya que los modelos no pueden tener en cuenta la interacción total de elementos de un sistema dinámico sensible como los ecosistemas, en los cuales hay ciclos y bucles que se rompen y se reengarzan en otra red, dando la sensación de que el fenómeno es completamente normal.

En vez de tratar de descifrar las cadenas de causalidad, hay que buscar los nódulos donde se unen los bucles de realimentación y procurar identificar el mayor número posibles de bucles en el sistema, de manera de aprender acerca de los puntos críticos del mismo y por ende de su homeostasis. De manera que no se trata de controlar al sistema, sino conocer su funcionamiento para interactuar con él más armoniosamente.

Fuerzas y Flujos

En la revisión de conceptos que proporciona la termodinámica, encontramos que la producción de entropía se expresa de manera simple y general en términos de las llamadas fuerzas y flujos termodinámicos asociados a la ocurrencia de un conjunto de procesos irreversibles. A cada fuerza le corresponde un flujo: ejemplos sencillos de estas cantidades son el gradiente térmico y el flujo de calor, el potencial eléctrico y la corriente eléctrica, el gradiente de densidad y el flujo de masa, entre otros. En situaciones próximas al equilibrio, flujos y fuerzas termodinámicas se relacionan entre sí por leyes empíricas lineales. En un proceso de complejidad arbitraria, el flujo se expresa como una combinación lineal de todas las fuerzas. Esta formulación permite definir el concepto de estado estacionario, de no equilibrio y de determinar los criterios de estabilidad y evolución a los que se refiere.

Para sistemas termodinámicos alejados del equilibrio, como los ecosistemas, podríamos hablar también de flujos y fuerzas implicados en los procesos irreversibles que en ellos se generan. Sin embargo, el énfasis no debe realizarse en la fuerza, ya que éste no es el parámetro principal que permita adoptar una conducta a priori en nuestra relación con la naturaleza. La susceptibilidad del ecosistema se va a desarrollar por el flujo, el cual conlleva a una respuesta de la sensibilidad del ecosistema.

La comprensión de los ecosistemas está íntimamente relacionada con las tasas de circulación dentro del sistema escogido. En los ecosistemas, se presenta flujo de energía y materiales que atraviesan las fronteras hacia el interior y el exterior del mismo. Cuando se describen estos flujos, se describe el ambiente del ecosistema. En los ecosistemas se dan circuitos acuosos, gaseosos, minerales, etc., que caracterizan a un tipo determinado de flujo, y es precisamente la calidad de éste el que influye sobre la sensibilidad del ecosistema y por ende sobre sus miembros. Si el flujo se sale del ecosistema, se generan respuestas en los individuos, así podemos observar cómo los animales se desplazan del nicho que ocupaban y en las plantas se observan cambios somáticos particulares, de manera de adecuarse a las fluctuaciones, variaciones que se dan en su ambiente.

Ahora bien, al considerar el flujo, debemos centrar nuestra atención en varios aspectos fundamentales como son el tipo de flujo (factor intensidad), la cantidad de flujo (factor cantidad) y el ritmo con el que éste ocurre.

Considerando a las especies que pueden movilizarse, debemos en primer lugar tener presente que una especie tiende a ocupar todo el espacio físico que se le presenta disponible. Cuando ocurre un flujo de alguna especie, se debe prestar especial atención a cuál es la especie que está migrando y qué lugar ocupaba en el ecosistema, ya que ésta es quien va a desencadenar toda la dinámica de cambio. Por ejemplo, si la especie que migra ocupaba un papel de regulador en el ecosistema, al darse el flujo de la misma, todas las especies que dependen de ella emigrarán conjuntamente con ella, y las especies que se encuentra en un nivel inferior en la escala del ecosistema, tenderán a ocupar todo el espacio físico que era regulado por la especie que ya no se encuentra. A corto o mediano

plazo, puede ocurrir que la cantidad de ejemplares o la diversidad de especies mermen y el ecosistema pierda su flexibilidad ante la perturbación, desencadenándose así un proceso irreversible que puede conducir a la aniquilación del mismo.

No obstante, como se discutió anteriormente, sabemos que el flujo aparece cuando existe un gradiente, (en los sistemas fisicoquímicos, por ejemplo, el flujo de calor aparece por un gradiente de temperatura) y esta consideración también es válida en los sistemas ecológicos. Esto nos estaría indicando que si conocemos cuál es el flujo podemos, por lo tanto, tener una idea de cuál es el gradiente que está operando, y actuar en el sentido de disminuir la influencia del mismo y frenar de esa manera el flujo. Por otro lado, si conocemos el gradiente (natural o inducido) podemos preveer qué flujo va a ocurrir, y ante esta situación, podemos actuar antes de que se desencadene el movimiento de la especie que es sensible al gradiente presente, y provocar en consecuencia que el ecosistema evolucione hacia un nuevo estado.

Es evidente que la crisis en los ecosistemas se acentúa por la acción del hombre. Estas crisis, resultantes de perturbaciones que influyen sobre el ecosistema, no sólo se han multiplicado peligrosamente, sino que al aumentar en número han producido efectos impredecibles y, por tanto, inesperados a escala planetaria. El flujo puede desencadenar que el problema abandone el ámbito local en el cuál se generó y pase a ser de carácter global. Así, por ejemplo, encontramos que el flujo de dióxido de carbono, resultado de la acción humana, ha desencadenado un cambio climático global: el efecto invernadero; la acción de los clorofluorocarbonados (CFC), cuyo resultado es la disminución de la capa de ozono, afecta a todo el planeta, o el intercambio de flujos sólidos (personas, materia, etc.) que puede generar la proliferación de enfermedades que pasen a tener carácter epidémico.

Conclusiones

Al revisar los conceptos fundamentales que proporciona la termodinámica del no-equilibrio encontramos herramientas conceptuales que permiten reconstruir nuestro diálogo con la naturaleza desde una perspectiva diferente. La teoría de los sistemas disipativos, las fluctuaciones y las bifurcaciones nos permiten pensar en otra posibilidad; ya no en considerar a la naturaleza en homeostasis eterna, sino en un equilibrio dinámico en tensión expandiéndose hacia una complejización creciente.

La evolución puede considerarse como un proceso que conduce hacia organismos crecientemente complejos y diversificados a través del nacimiento de nuevas estructuras disipadoras de orden superior. Esta nueva manera de ver los sistemas naturales plantea nuevos caminos de diálogo con la naturaleza, en la cual la complejidad está unida a la inestabilidad que es provocada por atractores extraños, los cuales engendran un nuevo tipo de régimen macroscópico en el cual aparecen estructuras disipativas dotadas de un gran orden en las que surgen correlaciones de largo alcance, en el cual el sistema actúa como un todo. Aquí la homogeneidad del espacio y la uniformidad del tiempo se pierden. A partir de la rama básica de la solución termodinámica del sistema, otras soluciones pueden ser obtenidas mediante inestabilidades sucesivas que tienen lugar cuando la distancia del equilibrio aumenta. Este tipo de inestabilidades puede estudiarse a partir de la teoría de las bifurcaciones, la cual introducirá la historia en el sistema. El sistema es susceptible al cambio, una fluctuación en vez de amortiguarse puede amplificarse, llegando a ser fuente de innovación y diversificación.

La ciencia debe proporcionar las herramientas necesarias para reelaborar el diálogo con la naturaleza, a fin de generar una conducta prevista a priori que ayude a armonizar las acciones que emprendemos frente a los problemas ambientales. No es posible seguir centrando nuestros esfuerzos en tratar de dar respuestas ante cambios fundamentales y potencialmente peligrosos que se han operado en el seno de la biosfera. Debemos contar con elementos que nos permitan comprender las relaciones ecológicas, apreciar su complejidad y su dinamismo. No podemos centrar nuestra atención tan sólo en los instrumentos tec-

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

nológicos con los cuales intervenimos sobre la naturaleza, sino de verificar el impacto que los mismos ejercen sobre el ambiente con el cual se quiere interaccionar. La fe inquebrantable en el progreso, como consecuencia del desarrollo científico y tecnológico, ha constituido una utopía que ha llevado a la consecución de importantes logros para la humanidad, pero que también ha tenido sus desviaciones y ha producido efectos insospechados e indeseados sobre el ambiente.

Estos efectos podrían resumirse diciendo que el progresismo, mediante la aplicación de la ciencia y la tecnología, ha producido una degradación de la naturaleza de grandes proporciones. Nuestra misión como científicos y educadores es mediar con el conocimiento, el cual hasta ahora ha estado fundamentado en el racionalismo y empirismo y nos ha conducido a la premisa de que hay que aumentar el conocimiento para alcanzar el poder, el dominio sobre la naturaleza. En el cambio de nuestra relación con la naturaleza, deberíamos contemplar no sólo el desarrollo de aspectos científicos y técnicos de la humanidad, sino concebir también un desarrollo cuantitativo y cualitativo de valores éticos en el sentido más amplio.

En nuestra interacción con el ambiente debemos tomar en cuenta el conjunto de variables que se van a introducir, las cuales afectarán al sistema, y en el cual se generan una serie de posibles estados hacia los cuales evolucionar. En este sentido debemos introducir el concepto transversal de la multifactorialidad de los distintos escenarios ante la aplicación de una determinada tecnología, superando la premisa de utilizar la tecnología todo cuanto sea posible en nuestra relación con la naturaleza. A través de esta nueva visión de nuestra relación con ella, no podemos esperar predecir el estado futuro del sistema, sino que debemos ocuparnos por contar con elementos anticipatorios que permitan prever cuáles pueden ser los posibles escenarios hacia los que evolucionará el sistema frente a una perturbación o fluctuación. En este panorama, el determinismo no tiene cabida, pues el pasado y el futuro del sistema ya no juegan el mismo rol que antes; en la evolución, el sistema no regresa a conductas anteriores, sino que aparecen nuevos comportamientos, y es imposible predecir cuál de las posibles formas va a adoptar.

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

Este abanico de nuevas posibilidades que surgen del seno de la ciencia y que nos llevan a cambiar la óptica de interpretar a los sistemas ecológicos debe trasladarse a las comunidades, reconociendo la necesidad de que las generaciones actuales y futuras estén versadas en los conceptos que nos aporta la complejidad, a fin de lograr un ciudadano comprometido a tomar medidas individuales y colectivas para lograr el desarrollo de una sociedad sostenible. En este sentido, la educación debe asumir los nuevos desarrollos de la ciencia, pero no como repetidora, sino como generadora de cambios en un proceso continuo de amplia aplicación.

Evidentemente esto reclama una transformación del educador, quien no puede permanecer pasivo en su praxis diaria, centrando su acción en transmitir contenidos definitivos, que no admiten renovación. Es necesario que la nueva visión del mundo que nos ofrece la ciencia sea asumida en el salón de clases, lo cual requiere una preparación y actualización del docente, con la finalidad de que esté versado en los nuevos conceptos y enfoques y pueda transmitir a los jóvenes las nuevas ideas derivadas del seno de la ciencia, y promueva el pensamiento complejo necesario para enfrentar el dinámico cambio que se está gestando en el seno de la sociedad.

Si se ha de rescatar el ambiente y las perspectivas del ser humano que dependan de éste, el restablecer un diálogo con la naturaleza en el cual el hombre no se sitúe por encima de ella es primordial: en esta labor la educación tiene el compromiso de asumir su responsabilidad y generar los cambios necesarios para construir un espacio de reflexión en el cual el individuo tenga la oportunidad de integrar este nuevo concepto de conocimiento para incluirlo en su marco social y utilizarlo para resolver problemas, crear sistemas de valores y tomar decisiones en la gestación de una ciudadanía más informada, activa y responsable de su propio devenir.

Referencias bibliograficas

Alegría, H. y M. Gregori: «La Evolución Química. Un punto de vista para la enseñanza de las ciencias naturales. Una revisión», UPEL-Maracay: Trabajo de ascenso no publicado,1992.

Capra, Fritjof: *La Trama de la Vida*, Barcelona: Editorial Anagrama, 1998.

Fergusson, A.: "Fundamentos de una gestión ambiental (II)", *Ciencia al día*, 4.8 (1994).

Jost, J.: "On the Notion of Complexity", *Theory Biosci*, 117 (1998): 161-171.

Lovelock, James E.: *Las Edades de Gaia. Una biografía de nuestro planeta vivo*, Barcelona: Tusquets Editores, 1993.

Martínez, Miguel: *El paradigma emergente*, Barcelona: Ed. Gedisa, 1993.

Morin, Edgar: *El método*, Tomo I, Madrid: Ed. Cátedra, 1986.

— *El método*. Tomo III. Madrid: Ed. Cátedra, 1986.

Prigogine, Ilya e Isabelle Stengers: *La nueva alianza: metamorfosis de la ciencia,* Madrid: Alianza Editorial, 1990.

C O M
P L E
X U S

Revista de Complejidad, Ciencia y Estética

SENTIDO Y COMPLEJIDAD: CONVERGENCIAS Y DIVERGENCIAS EN DISTINTOS CONTEXTOS DE FORMACIÓN DOCENTE

Paulina Larrosa López
Iván Oliva Figueroa
Universidad Austral de Chile,
Facultad de Filosofía y Humanidades, Valdivia, Chile.

SENTIDO Y COMPLEJIDAD: CONVERGENCIAS Y DIVERGENCIAS EN DISTINTOS CONTEXTOS DE FORMACIÓN DOCENTE

Paulina Larrosa López - Iván Oliva Figueroa
Universidad Austral de Chile, Facultad de Filosofía y Humanidades,
Valdivia, Chile.

Resumen

El fenómeno educativo supone modos de configurar el desarrollo humano y su sentido en el campo de la formación. No obstante, los procesos educativos hegemónicos tienden a la rigidez y unidimensionalidad, arriesgando la fractura cognitiva y el consecuente debilitamiento de las pautas de agenciamiento, pertenencia y sentido complejo del desarrollo humano. Abordar las convergencias y divergencias en la construcción de sentido educativo, es en esta perspectiva, una tarea transversal a todos los dominios disciplinares de formación de docentes.

Palabras clave: ***sentido, complejidad, formación docente.***

Introducción

El humanismo hermenéutico de Gadamer (1977) es presentado como una salida a la ilusión de una objetividad que reduce al ser humano a simple espectador de lo que ocurre a su alrededor. El carácter existencial de su hermenéutica reivindica la participación humana en el comprender y le devuelve a una posición responsable. Asumir la Historia en términos de experiencia es una dimensión esencial de lo humano, su experiencia de existencia y sentido. Por esto Gadamer afirma: "…también nosotros, con nuestras historias —como con cada una de nuestras decisiones de la vida práctica— colaboramos con la construcción de una comunidad basada en lo que tiene sentido para nosotros, en aquello que nos parece lo bueno, lo mejor, lo justo." (Gadamer, 1977:106). Por otra parte esta visión interpretativa de la vida, el sentido y de la construcción que realizamos de ella y en ella, se complementa con la visión compleja propuesta principalmente por Morin (2001) y von Foerster (1980), quienes al rescatar la experiencia, sitúan al ser humano como agente activo dentro de la construcción de mundo, comprendiéndolo como un observador que realiza distinciones de su entorno y las configura, estableciendo relaciones que posibilitan la emergencia de nuevos fenómenos y campos de sentido.

Según Morin (1999) la educación ha buscado constantemente la unificación y las certidumbres, lo que pierde legitimidad desde las emergentes epistemologías que convergen en el entendimiento del fenómeno educativo. Bajo esta comprensión, la búsqueda de un conocimiento pertinente, contextualizado y multidimensional, es un desafió aún no cumplido por la educación contemporánea. Para a ello, debe emerger gradualmente una conciencia educativa mucho más abierta a la diversidad y la complejidad de lo humano, en donde el sentido del educar no se pierda en las parcialidades que se encierran tras los discursos replicantes que no representan el fundamento que le otorga una visión compleja, dinámica y relacional.

La disyunción de las experiencias, su descontextualización y parcialización en temáticas locales, restringen la experiencia humana y la acotan a dominios de observación triviales que desvanecen su sentido multidimensional y complejo.

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

En el ámbito educativo, ello no permite alcanzar un metacontexto en el cual extender la observación del fenómeno a un entendimiento mucho más amplio, necesario para interpretar desde un prisma global, las tramas latentes y confluyentes al sentido de la educación contemporánea desde sus diversas dimensiones de expresión disciplinar.

No obstante, la educación descontextualizada, parcial y sobremediatizada, pudiese ser integrada a enfoques lo suficientemente complejos, que permitan configurar los dominios paradigmáticos donde dicho ejercicio conforma sentido y se justifica. En este contexto, se propone abordar la comprensión del fenómeno desde una perspectiva hermenéutica y compleja, tratando de entender sus procesos de configuración, interpretando las experiencias de docentes en formación de distintos contextos disciplinares, como personales y únicos, a la vez que culturales y colectivos.

Desde esta base, es importante aproximarse a la comprensión de las condicionantes que pudiesen constreñir los horizontes de sentido en educación, abriéndose a espacios más amplios de análisis y síntesis, para simultáneamente indagar en los sentidos latentes a las formas de aprendizaje promovidas. Es necesario entonces, que los docentes habituados a una educación tradicional concebida para masas, objetiva y reduccionista, deban transitar a una emergente forma de educar que no reduzca las posibilidades configurativas en la comprensión que se tiene del ejercicio docente. Se pudiese estar en presencia de una nueva dimensión en la revalorización de lo humano, con consecuencias en los planos epistemológicos y metodológicos.

Educación y sentido

Las concepciones que se tienen acerca del sentido de lo humano se desintegran en las parcialidades del lenguaje, restringiendo el conocimiento a instancias especificas y disciplinares, provocando frustración, miedos y desidia a partir de una reducción arbitraria de los campos de sentido posibles de crear. A la luz de lo anterior, es posible indagar sobre las configuraciones paradigmáticas

co-creadas en los contextos de formación de docentes, como también las concepciones en juego sobre el sentido de la educación, indagando cómo esta concepción infiltra los procesos de discernimiento y su forma de construir mundo.

En estos términos, *"las causas de las transformaciones en la educación no deben ser buscadas sólo en la individualidad de cada sujeto, sino más bien en la estructura sociocultural ya que es ésta la que influye radicalmente en la naturaleza de la vida cotidiana, afectando las dimensiones más íntimas de nuestra experiencia"* (Giddens 1996: 33). Ello trasunta en una aproximación sistémica a las redes de sentido que justifican y estabilizan los marcos paradigmáticos hegemónicos en educación. De esta forma, la noción de lenguaje es abordada desde una concepción compleja desde su dimensión semántica, comunicacional y generadora de espacios de sentido, esto es, haciendo referencia de lo que significa *ser humano* (Echeverría, 1994).

En convergencia con lo anterior, todo proceso educativo de disyunción cognitiva, y con ello de reducción de sentido, conlleva el debilitamiento de las pautas de agenciamiento y pertenencia en la configuración de territorialidad en las redes educativas (Lavanderos, 2003). Desde la interpretación del conocer como un proceso emergente de configuraciones relacionales que son generadas desde la extracción de diferencias de un observador dentro de su entorno; el significado es lo que permite agenciar pautas de territorialidad mediante procesos de pertenencia e identidad (Lavanderos; Malpartida, 2000; Lavanderos, 2003). Desde esta base, la indagación en torno a las configuraciones de sentido cogeneradas en los contextos de formación inicial de docentes, es posibilidad y condición para la construcción semiótica de procesos de identidad y territorialidad más complejos e integradores.

El énfasis en la formación inicial de docentes como cota socio-cultural, tiene relación con la necesidad de indagar sobre las concepciones que pudieran gestarse durante este proceso, como asimismo, las aproximaciones al contexto educativo realizadas mediante los períodos de práctica. Villegas-Reimers (1998); Brunner y Elacqua (2003), sostienen que la dimensión constitutiva al sistema educativo más importante en términos de calidad y equidad de la educación, son los docentes y su formación. En consecuencia, la formación inicial docente resulta ser neurálgica, dado que es la instancia responsable de formar a los pro-

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

fesionales que deberán en gran medida, conducir cambios cualitativos de la educación. Dicho de otro modo, si se considera la Educación como eje rector de las transformaciones culturales y sociales, se puede asumir con toda propiedad que la formación de los docentes es la estrategia que promueve tales cambios con mayor efectividad (Pérez-Jiménez, 2003). De esta manera, se comprende la necesidad fundamental de aproximarse a los fenómenos asociados a la formación docente, como constructores (y no transmisores) de espacios de sentido y horizontes de *realidad* de la cultura.

La existencia de condiciones para repensar los modos de formar a los nuevos docentes se viene gestando desde mediados de los años 90 en Chile, proveniente en términos generales de la visión crítica en torno a la calidad de los programas de formación docente; la disminución del interés de los mejores estudiantes por acceder a carreras de Pedagogía –en la opinión de los propios estudiantes de esta disciplina– y en la autocrítica de las propias instituciones de formación. En resumen, los principales puntos de análisis se centraban en el currículo, estrategias de enseñanza, vinculación al contexto educativo y las demandas de la reforma educacional, calidad de los docentes formadores, condiciones para el trabajo de los estudiantes, problemas de coordinación institucional y calidad del desempeño de los egresados (Ávalos, 2002).

Estas cotas observacionales son ampliadas a un meta nivel epistemológico desde el trabajo de Morin (2001), donde los paradigmas clásicos de la *ciencia, el control y la verdad* se desestabilizan, escapando al dogmatismo a veces embebido de arrogancia que deambula en los pensamientos lineales y positivistas hegemónicos en las redes educativas. Desde esta base, la formación de docentes se enfrenta a reformas cognitivas no triviales, que difícilmente se jugarán en el ámbito cuantitativo y estructuralista.

Los aportes de la epistemología de la complejidad al contexto de formación docente proporcionan un eje de entendimiento para abordar las diversas dimensiones que contempla el fenómeno acerca de la construcción y configuración de sentido; es por tanto, en esta perspectiva, un enfoque relevante de considerar para la orientación de estrategias de índole cualitativa en materia de formación docente.

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

En este contexto, los modelos de formación inicial docente tradicionales enfrentan una profunda crisis, debido fundamentalmente al cuestionamiento de sus bases paradigmáticas y a la aparición de formas más complejas de interpretar las procesos de conocimiento y sus implicaciones en el desarrollo multidimensional de los países (Ministerio de Educación de Chile, 1998; Ávalos, 1999). De igual modo se plantea que la observación y diagnóstico en Chile del proceso de formación inicial docente, permite identificar algunos problemas, entre ellos: formas inadecuadas de acción pedagógica, fragmentación de los contenidos disciplinarios y su desconexión con los requerimientos pedagógicos. De acuerdo con lo anterior, estos paradigmas podrían encontrarse presentes en diversas áreas disciplinares pertenecientes a los dominios *científicos y humanistas*, transformándose en una forma de tensión supralógica que los trasciende.

Si bien existen cambios curriculares, es necesario diseñar estrategias destinadas a reconfigurar el sentido de la educación hacia órdenes más complejos de entendimiento, rompiendo las lógicas de la reproducción, para abarcar y comprender órdenes más complejos de construcción de mundo. De esta manera comprender el por qué y el para qué educar, debería representar la base de todo programa de formación docente, en el cual independiente al área de estudio, conlleve una perspectiva multidimensional del ser humano, comprendiendo el sentido de las disciplinas en este metacontexto.

Lo anterior permite la generación de elementos de sentido para desenvolverse en una sociedad que necesita una revalorización y reconfiguración del sentido de lo humano. La interpretación a nivel epistemológico del fenómeno de construcción de sentido, necesariamente deviene en una transformación de las nociones asociadas a ella y que subyacen en las diversas etapas, procesos y fenómenos que se evidencian a lo largo de la formación docente.

Es relevante recordar que a lo largo del desarrollo histórico de las ciencias, las llamadas *ciencias duras y las humanas*, se han visto enfrentadas a grandes divergencias, debido a que la primera promueve y fundamenta todo su accionar en base a las certezas, mientras que las ciencias humanas fundamentan su conocimiento en las incertidumbres (Ardoino, 2005). Aunque lo anterior es relativo, es posible sostener que las diversas áreas disciplinares configuran marcos supralógicos o para-

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

digmáticos asociados a sus formas de construcción de conocimiento.

Desde el trabajo de Espina (2007), la universidad clásica y la metodología tradicional de la ciencia descansan y se proyectan desde los modelos educativos extendidos socialmente. Asimismo, los planteamientos de diversas investigaciones sugieren que los distintos dominios disciplinares suelen interpretar de modos disímiles sus procesos educativos (Buehl y Alexander, 2002). Desde este supuesto, se propone un modelo auto-eco-organizativo para abordar teórica y metodológicamente los procesos de generación de autonomía disciplinar y sus dimensiones relacionales emergentes en el campo educativo.

El sentido de las nociones de *ciencia, vida y ser humano*, de acuerdo a las áreas científica y humanista, devienen en perspectivas distintas de comprensión en relación a cómo se concibe el fenómeno del conocer. Dichos procesos de convergencia y divergencia son los que deben ser abordados en busca de un metacontexto que permita construir y conciliar un sentido global de educación que a la vez respete las particularidades de cada forma de expresión disciplinar.

Aproximaciones metodológicas

La complejidad de este fenómeno precisa de ciertas formas para la construcción del conocimiento que sean lo suficientemente amplias, sistemáticas y flexibles para abordarlo sin desvirtuarlo; formas que por su naturaleza contemplan un pensamiento relacional, en palabras de Morín (2001), un pensamiento ecológico.

A partir de lo anterior, el enfoque de un programa de investigación en el área es básicamente cualitativo y tal como sostiene Arnold (1998), comprende una observación de segundo orden, orientada a la observación de sistemas de observadores y sus respectivas observaciones. El núcleo de interés está en observar lo que los observados indican y describen, el *qué observan*, como también, captar los esquemas de diferencias con que marcan tales observaciones y trazan sus distinciones, el *cómo observan*. Las cotas comunicativas del estudio quedarían definidas por los espacios temáticos pertinentes a la investigación; en este caso,

todos aquellos tópicos que tengan sentido para los informantes en el contexto de su formación docente y configuración de sentido educativo, es decir, todo aquello cuya relación genere sentido para los sujetos en el contexto (ámbito o campo) comunicativo referido a los campos de sentido del fenómeno educativo.

Las técnicas de recolección de información deberán responder a la necesidad de generar, en distintos niveles de análisis, eventos comunicativos regulados pero no directivos, que posibiliten una aproximación a los procesos de configuración de sentido en el ámbito educativo.

Al sostener que el sentido es un fenómeno sistémico, el modelo de análisis debe adoptar un énfasis reticular. Una técnica de análisis específica se basa en el concepto de redes cognitivas, esto es, un sistema computacional que grafica los procesos asociativos de distinciones, considerando la diversidad de elementos y los efectos sistémicos de su organización en dimensiones de sentido convergentes y divergentes. El análisis a partir de la organización graficada es la base para el desarrollo de análisis de redes semióticas (Lavanderos, Malpartida, 2000). Derivado de lo anterior, la batería de análisis puede integrar análisis tales como: conceptos iniciadores (*tail*), conceptos terminales (*head*), dominio, centralidad semiótica (cálculo de atractores), conjunto jerárquico de agrupaciones (*cluster*) y análisis de ciclos tautológicos. El criterio para evaluar procesos de convergencia y divergencia semiótica se focaliza en la conservación de los atractores de las redes generadas, estos es, los nodos de mayor densidad relacional en términos semióticos (Lavanderos, Malpartida, 2000).

Cabe enfatizar que toda aproximación indagativa de este orden, no es realizada sólo para rescatar las formas de conocimiento individuales de cada informante, sino además, como usuarios de los medios observacionales e interpretativos disponibles en el repertorio de sus contextos formativos (Arnold, 1998). En definitiva, la modelación de redes cognitivas y la batería de análisis de información asociada, posibilita tres niveles de indagación en términos de los procesos de configuración de sentido educativo en distintos contextos disciplinares: a) una caracterización de los elementos de inteligibilidad en torno a su construcción, b) los efectos de integración de dichos elementos en redes semióticas complejas y c) inferencias a los contextos formativos-culturales en los que participan

los estudiantes.

Desde la base de este análisis, es posible encontrar distinciones del plano argumental que centralizan y pautan la relación de ideas, permitiendo identificar las nociones de sentido que surgen en el entramado configuracional, entre ellas, las ideas centralizadoras que guían y median el contexto general en el que se expande el sentido. Es importante señalar que el cartografiado corresponde a una aproximación diacrónica de las ideas y distinciones que realizan los informantes, el cual debe ser entendido en el carácter dinámico que adquiere en el proceso de configuración de sentido.

En definitiva, el énfasis en una epistemología de segundo orden (von Foerster, 1980) y su proyección metodológica, posibilita la comprensión y aproximación del fenómeno del sentido en educación a partir de un prisma menos lineal y reduccionista, centrado en formas y sistemas de observación y no en unidades positivistas divorciadas arbitrariamente de sus campos de producción cognitivos.

A modo de síntesis

Desde esta base fenomenológica, es necesario comprender la localidad y globalidad de los procesos de generación de sentido en la educación contemporánea y a la vez, sus procesos de convergencia y divergencia en la diversidad de contextos disciplinares que le son pertinentes. En síntesis, es fundamental aproximarse a las nociones que emergen en torno al sentido, sus efectos de asociación en redes semióticas complejas y su influencia en los programas de acción en educación. La complejidad de los emergentes configurativos de todas estas nociones, llevan a comprender que a pesar del intento de establecer dominios cognitivos, categorías y tipologías formales, es fútil reducir el fenómeno del sentido a instancias particulares. Todas estas nociones altamente imbricadas toman forma en desdibujados contextos complejos en donde se reformula constantemente la experiencia y los sentidos de la educación contemporánea.

Bibliografía

Ardoino, Jacques: *Complejidad y formación. Pensar la educación desde una mirada epistemológica*, Buenos Aires: Facultad de filosofía y letras (UBA) y Ediciones Novedades Educativas, 2006.

Arnold, Marcelo. «Recursos para la investigación sistémico/constructivista», *Cinta de Moebio* 3 (1998). Disponible en http://www.moebio.uchile.cl

Ávalos, Beatrice: *Profesores para Chile. Historia de un proyecto*, Santiago de Chile: Ministerio de Educación, 2002.

Brunner, José J. y Gregory Elacqua: *Informe capital humano en Chile. Santiago de Chile*, Universidad Adolfo Ibáñez/ Escuela de Gobierno, 2003.

Buehl, M. y P. Alexander: «Beliefs about schooled knowledge: Domain specific or domain General?», *Contemporary Educational Psychology* 27 (2002): 415-449.

Echeverría, Rafael: *La ontología del lenguaje*, Santiago Chile: Dolmen Ediciones, 1994.

Espina, Mayra P.: «Complejidad, transdisciplina y metodología de la investigación social», *Utopía y praxis latinoamericana*, 12.38 (2007): 29-43.

Gadamer, Hans G.: *Verdad y método*, Salamanca: Ed. Sígueme, 1977.

Giddens, Anthony: *Modernidad y autoidentidad. Las Consecuencias Perversas de la Modernidad*, Barcelona: Ed. Anthropos, 1996.

Lavanderos, Leonardo y Alejandro Malpartida: «Tópicos en torno a la cognición relacional», Santiago de Chile: Corporación Sintesys, 2000.

Lavanderos, Leonardo: «Estrategias cognitivas en el contexto educativo», *Nuevas epistemologías y estrategias en educación: Conocer en relación*. Iván Oliva (comp.) Documento Proyecto MECESUP Programa de Doctorado en Ciencias de la Educación. Santiago de Chile: Facultad de Educación, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Ministerio de Educación de Chile: *Reforma en marcha: Buena educación para todos*, Documento oficial. Santiago de Chile, 1998.

Morin, Edgar: *Los siete saberes de la educación del futuro*, París: UNESCO, 1999.

Morin, Edgar: *Introducción al Pensamiento Complejo*, Barcelona: Ed. Gedisa, 2001.

Pérez-Jiménez, César: «Formación de docentes para la construcción de saberes sociales», *Revista Iberoamericana de Educación* 33: (2003). Disponible en http://www.rieoei.org/rie33a02. PDF

Villegas-Reimers, Eleonora: «The Preparation of Teachers in Latin America», The World Bank, Human Development Department, 1998.

Von Foerster, Heinz*: «Epistemology of communication», The myths of informations: Technology and postindustrial culture*, Kathleen Woodward (Ed.), Madison: Coda press, 1980. 18-27.

COMPLEXUS
Revista de Complejidad, Ciencia y Estética

AUN MÁS LECCIONES A PARTIR DE LA COMPLEJIDAD. LA IMPOTENCIA DE LAS LEYES DE POTENCIA Y LA FORTALEZA DE UNA CAMPANA

Carlos E. Puente

Department of Land, Air and Water Resources
University of California, Davis
Davis, CA 95616, Estados Unidos
cepuente@ucdavis.edu

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

AUN MÁS LECCIONES A PARTIR DE LA COMPLEJIDAD. DE LAS LEYES DE POTENCIA Y LA FORTALEZA DE UNA CAMPANA

Carlos E. Puente

Department of Land, Air and Water Resources
University of California, Davis
Davis, CA 95616, Estados Unidos
cepuente@ucdavis.edu

Durante las últimas décadas han proliferado las leyes de potencia como señales de la complejidad. Ellas se encuentran en la distribución de frecuencias de diversos procesos naturales violentos, tales como terremotos y avalanchas, y también se hallan en diversas manifestaciones de la violencia humana, tales como la riqueza de las naciones y las guerras en el mundo. Recientemente, el autor introdujo un procedimiento platónico encaminado a comprender la complejidad natural como la sombra de una transformación iluminada por un objeto multifractal. Este artículo muestra, en su primera parte, cómo podemos aprender de las leyes potencia para reafirmar la equidad como la única condición que puede generar la paz, y en su segunda parte, cómo el procedimiento platónico da lugar, en casos límite, a distribuciones gaussianas que, contrastando las leyes de potencia y al estar ligadas con los procesos de difusión y conducción, proveen otras lecciones relevantes para la paz. Se muestra cómo dichas campanas aportan una invitación a la unidad y a la armonía en el límite, pues sólo allí surge una belleza exótica que trastoca cualquier desorden, y porque además existe un caso especial cuya transformación positiva dota una curva normal que asombrosamente lo concentra todo en el infinito.

Palabras clave: ***leyes de potencia, complejidad, lecciones, campana de Gauss, paz, plenitud, amor***

1. Introducción

Las últimas décadas han dado lugar al desarrollo de una serie de ideas encaminadas a entender y predecir la complejidad natural. Entre ellas, se encuentra el uso de modelos basados en estados críticos para representar las ubicuas relaciones de potencia presentes en la violencia natural y el empleo de procedimientos geométricos que intentan describir las intermitencias y tendencias presentes en las observaciones de la complejidad.[1]

Este trabajo muestra cómo tales nociones pueden emplearse para invitar a la paz, pues ellas proveen un marco de referencia coherente e imparcial que nos permite visualizar la dinámica y las consecuencias de los rasgos divisivos propios de la humanidad, incluyendo las opciones esenciales de orden y desorden que todos confrontamos en nuestras vidas. Complementando otras lecciones a partir de la complejidad basadas en la forma en que ocurren la turbulencia y el caos,[2-3] y argumentando, como en dichos trabajos, que podemos aprender de la forma en que sucede lo complejo para obrar en su defecto, este artículo reafirma cómo la paz verdadera sólo puede lograrse en lo sencillo, y esta vez en un estado caracterizado por los adagios imperativos geométricos: "que sea cero tu potencia", y "que tu transformación sea siempre positiva y máxima."

La organización de este trabajo es como sigue:

Primero, se explica qué son las leyes de potencia y se muestra cómo a partir de ellas aparecen pautas certeras hacia la equidad en el mundo y la paz, que contemplan el que evitemos comportamientos 'críticos' en nuestras vidas. Luego, se repasa un procedimiento geométrico platónico capaz de representar observaciones típicas de complejidad, y también distribuciones 'pacíficas' gaussianas, en una o más dimensiones, por medio de sombras de alambres fractales iluminados por distribuciones multifractales. Después se explica, en contraste con las leyes de potencia presentes en los datos complejos, cómo el caso gaussiano representa, en efecto, la mejor invitación a la paz y la armonía, pues sólo allí reside una belleza exótica, y porque existe un caso particularmente significativo concentrado en el infinito que invierte universalmente cualquier entropía. Finalmente, el trabajo se resume por medio de una poesía-canción.

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

2. Leyes de Potencia por Todos Lados

Como es bien sabido, en los últimos años se ha descubierto la presencia común de leyes de potencia, particularmente sencillas, en diversos procesos relacionados con la complejidad natural.[4-5] En la Figura 1 se observa la que es quizás la más famosa de ellas, y que define la escala de Gutenberg-Richter en los terremotos.

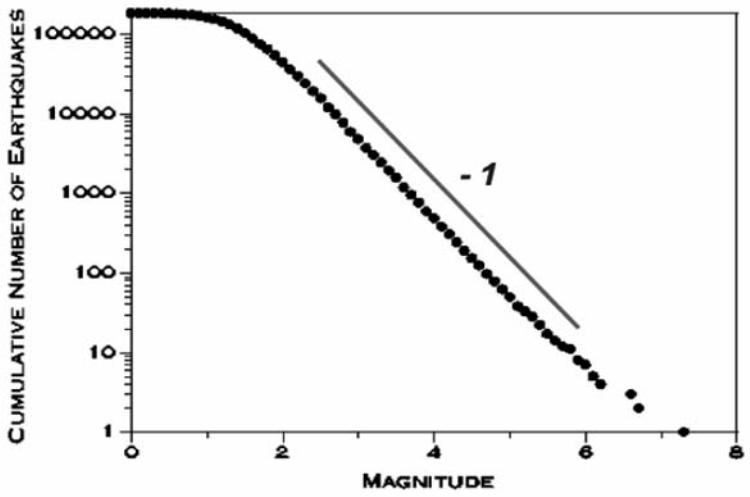


Figura 1. Distribución de frecuencias de terremotos en el Sur de California. Cortesía de Southern California Earthquake Center

Como se observa, la cola de la distribución de probabilidades de los terremotos exhibe un comportamiento aproximadamente lineal en escala doble-logarítmica, que refleja la relación de potencias $P[X \geq x] \sim x^{-c}$ con el exponente $c \approx 1$. Como es de esperarse, los eventos de menor magnitud tienen una probabilidad de excedencia mayor y los eventos de mayor magnitud tienen una probabilidad de excedencia menor, pero la transición entre escalas en la 'cola pesada' ocurre en la misma 'línea', y sin ningún pico notorio, indicando así que no existe un terremoto típico de un tamaño 'característico'.

Las leyes de potencia también se encuentran en otras manifestaciones de la violencia natural tales como las inundaciones, las avalanchas, las erupciones

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

volcánicas y los incendios forestales.[6] Aunque el exponente no es igual para todos los procesos, las distribuciones se alinean de una manera particularmente sencilla que indica el que dicha complejidad tenga propiedades universales, como ocurre con los conjuntos fractales y que ella sea, al final, no tan compleja como lo podría ser.

Además de la furia natural, las leyes de potencia también aparecen prominentemente en diversas situaciones relacionadas con las acciones de nosotros mismos como humanos. Como lo observó por primera vez Vilfredo Pareto, dichas leyes se hallan, por ejemplo, en las distribuciones sesgadas de riqueza en el mundo, tanto dentro de cada una de las naciones como en el mundo en general. Para ilustrar dichas ideas, la Figura 2 muestra la distribución de ingresos en el mundo desde sus percentiles 30 al 85, y allí se aprecia el doloroso ensanchamiento de las desigualdades en dos líneas con pendientes negativas y en escalas doble-logarítmicas de 1960 a 1997.[7]

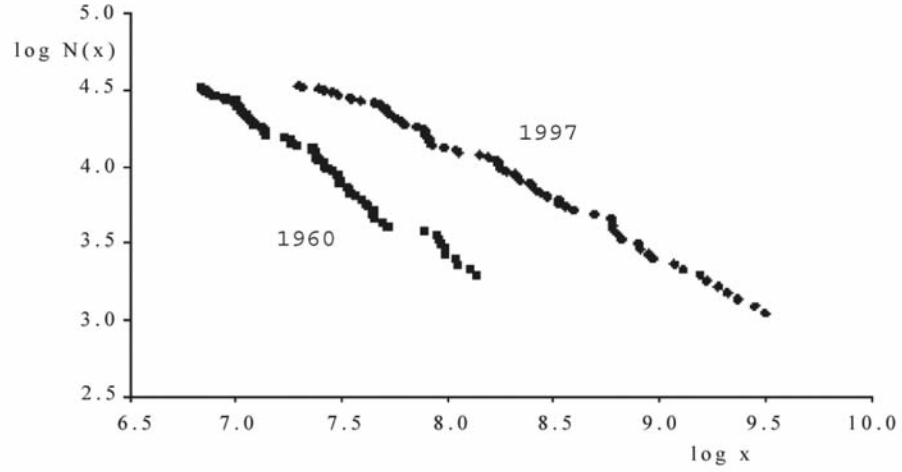


Figura 2. Percentiles 30 al 85 de la distribución de ingresos en el mundo (PIB per cápita). Se grafica la formula $\log i + \log M + \log (1 - N(x_i)$*, donde i es la clasificación de una nación, M es el número de naciones y* $N(x_i)$ *es la función de distribución de ingresos acumulados.*

Lo expresado en la Figura 2 es triste en verdad, pues, tal y como es bien sabido, las dos terceras partes de nuestros hermanos y hermanas viven bajo la espinosa condición de la pobreza,[8] y porque además, las inequidades reinantes impiden el florecimiento de una paz verdadera en el mundo.

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

Aunque, claro está, no todas las naciones son igualmente pobres, para el país más poderoso del mundo, no incluido en la Figura 2, la situación de desigualdades no es, en verdad, realmente mejor. En efecto, la distribución de riqueza dada por la simple cascada multiplicativa, relacionada con la turbulencia natural mostrada en la Figura 3, utilizando el mismo parámetro $p = 0.7$ hallado universalmente en la naturaleza, y para 20 niveles del proceso, es comparable en sus percentiles 5, 10, 20 y 40 a lo reportado para Estados Unidos en 1998, es decir 57(59), 70(71), 84(84) y 95(95%), con los valores de la cascada dados en paréntesis.[2,9]

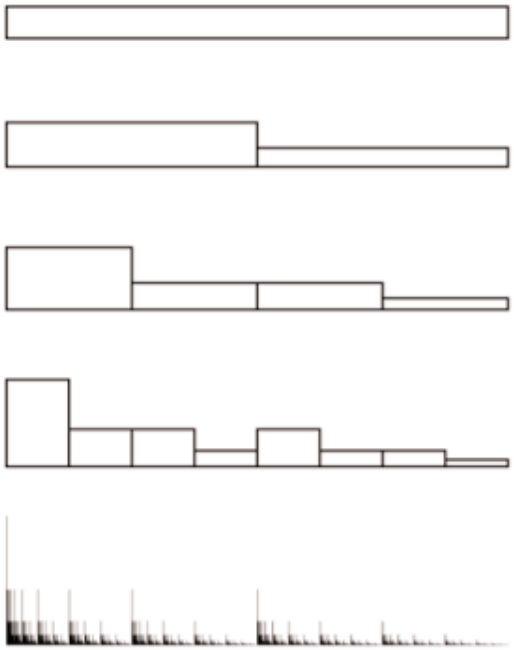


Figura 3. Una cascada multiplicativa clásica que sesga la energía por izquierdas en un factor 70-30%.[2] Los niveles 0 al 3 se grafican a escala, pero el nivel 12, debajo, se muestra comprimido.

Las desigualdades en el mundo son ciertamente una realidad, y la distribución acumulada de la riqueza en las naciones se ve tristemente más reflejada en las espinas multifractales producidas por una cascada que finalmente disipa, como en la Figura 3, que en la condición de uniformidad que responde al adagio de "que toda montaña sea cortada y todo valle rellenado", es decir el nivel 0 antes que la cascada divisiva comience.

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

Otro ejemplo fundamental en el que se halla una ley de potencias, concierne a la distribución de los conflictos humanos y las guerras. Tal y como lo notó por primera vez el físico, meteorólogo y pacifista Lewis Fry Richardson inmediatamente después de la segunda guerra mundial, la distribución acumulada del número de muertos, es decir la severidad de un conflicto, desde aquellos generados por luchas de pandillas hasta las grandes guerras, se alinean en una ley aproximada como se observa en la Figura 4.[10]

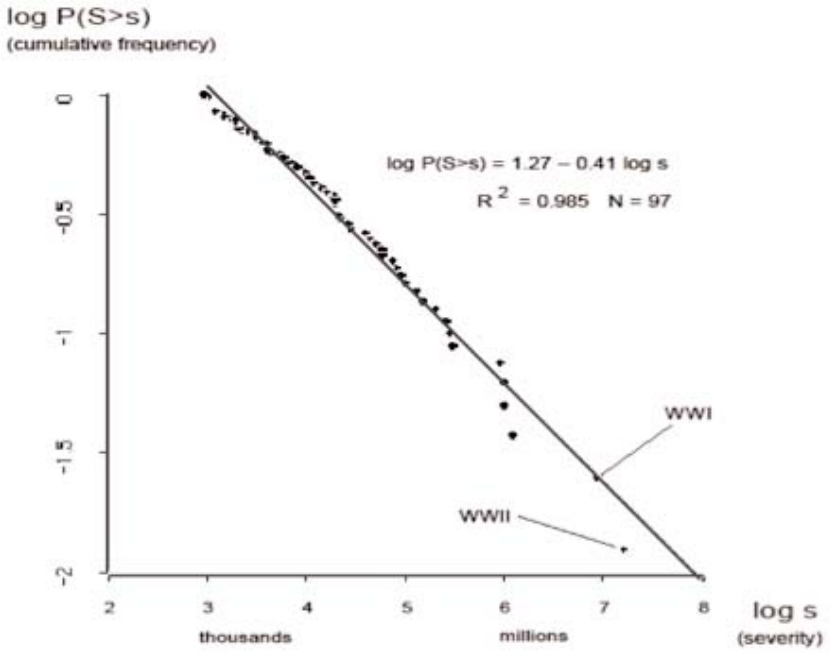


Figura 4. Distribución acumulada de guerras severas entre naciones.

Notablemente, o quizás no, todos los datos que reflejan nuestra violencia perversa están ajustados por una expresión lineal en escalas doble-logarítmicas, y esto nos recuerda potentemente que para poder realmente evitar la siguiente gran conflagración debemos acabar con los conflictos pequeños, incluidos en ellos, en virtud a la carencia de una escala característica, aquellos que se suceden dentro de nosotros mismos.[5]

3. Las Leyes de Potencia y la Búsqueda de la Paz

A partir de los resultados mostrados hasta ahora surgen elementos que sustentan nuestro sentido común y nuestra búsqueda de la paz. Como la violencia natural y también aquella generada por el hombre da lugar a leyes de potencia, es pertinente estudiar cómo ellas se producen para, al evitar dichos mecanismos, encontrar la armonía y la paz.

Dichas leyes, sencillas y divisivas a la vez, se hallan a partir de diversos procesos.[11] Éstas aparecen mediante las anteriormente mencionadas cascadas multiplicativas ilustradas en la Figura 3, por medio de las conexiones preferenciales típicas en las redes humanas, a partir de la llamada tolerancia altamente optimizada que refleja la desorganización en nuestro mundo moderno, y prominentemente, por medio de la célebre auto-organización crítica esbozada por el bosquejo mostrado en la Figura 5.[12] Allí se observa la implacable acumulación de energía que hace crecer una pila de arena en la playa hasta que su pendiente claramente excesiva, y por ende crítica, genera avalanchas predecibles de tamaños impredecibles y con una distribución dada por una ley de potencias.

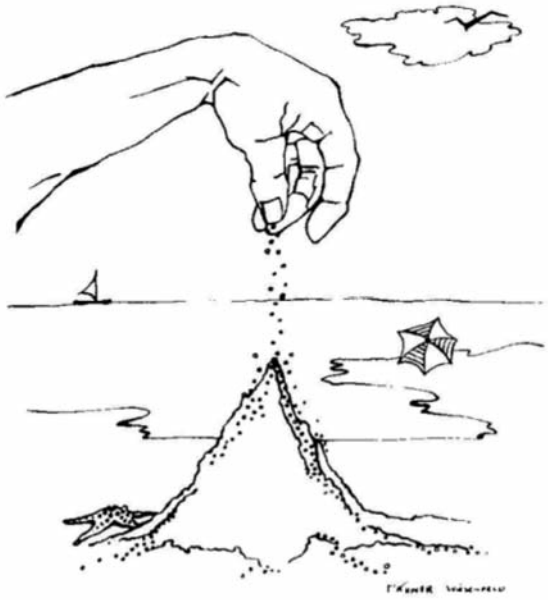


Figura 5. Una mano haciendo crecer una pila de arena para generar avalanchas.

Como podemos observar por analogía, los males que nos aquejan no se deben necesariamente a una mano invisible que nos maneja, aunque acaso sí si nos dejamos, sino más bien a nuestras propias acciones divisivas que debemos rectificar si en efecto deseamos la paz. Pues tal y como se puede apreciar de una manera vívida, los humanos sin escala desafortunadamente abusamos de nuestra potencia esencial, y por medio de nuestro egoísmo y codicia, creamos, predeciblemente al mal acumular energías, las críticas leyes de potencia que producen no poco dolor y miseria.

De aquí se desprende que el mejor adagio sea: "que sea cero tu potencia" pues éste es el único caso, en la igualdad del equilibrio, que garantiza matemática y geométricamente la unidad. Pues sólo extinguiendo nuestras leyes de potencia, por pequeños que sean nuestros exponentes, y por ende nuestros estados críticos siempre lejanos del equilibrio y al borde de la desintegración, podremos evitar el horrendo espiral egoísta negativo y el mismo número 6 que refleja nuestro triste grado de desconexión que impide una paz verdadera.[13] Pues existe en verdad una única solución y nosotros sabemos que ella no es $2/3 = 0.666\ldots$, ya que debemos reparar nuestro mundo fractal abandonando el poder destructivo de las impotentes leyes de potencia para más bien abrazar el poder supremo de la carencia de poder en el servicio de unos a otros para construir la unidad. Pues los conflictos no pueden desaparecer si no lo hacen en nuestros corazones, a la escala más pequeña, pues una gran guerra es, al final, un conflicto pequeño que creció y creció.

Con respecto a las desigualdades económicas, acaso parte de la solución obvia se encuentra en el apellido de quien encontró dicha ley de potencia. Pues, si se parte la palabra "Pareto" y se interpreta con la apócope caribeña "pare tó" significando "pare todo", podemos observar el primer paso requerido para evitar la dolorosa disipación prescrita por la física y la proliferación indeseada de la desunión. Pues aunque pareciera que existen mejores naciones que otras al comparar no solamente sus PIB sino también sus índices de Gini, es decir, la diferencia en área entre las distribuciones acumuladas de las desigualdades y de la equidad, son esas distribuciones acumuladas sesgadas, bien denominadas escaleras del diablo por su mentirosa ineficiencia,[2,9] las que reflejan el devenir insulso

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

de nuestro afán por el dinero, que, tal y como lo sabemos, constituye la raíz de todos los males.

Al final, de estas observaciones se desprende que la solución para la paz es la organización no preferencial del amor, o dicho empleando el espíritu del cálculo "*la integración sin diferenciación*". Como dicha aseveración tiene sólo una solución en la función exponencial positiva, e^x, y con 1 como la derivada interna;[14] y como la función logarítmica es la inversa de la exponencial, podemos observar de una manera ingeniosa cómo la minimización de energía siempre presente en el egoísmo no domesticado genera leyes de potencia y cómo la inherente carencia de unión que produce violencia es en efecto una manifestación esencialmente diabólica que esboza tres simbólicas negaciones, en los dos logaritmos y en la línea aproximada con pendiente negativa.

Pues la palabra logaritmo proviene de cortar un número de acuerdo a una base, pero también significa, en inglés, el cortar o talar árboles para producir, por ejemplo, una cabaña de troncos, los cuales tienen la misma forma cilíndrica que representa, en español, la misma viga negativa en el ojo que refleja nuestra hipocresía. Después de todo, todas las leyes de potencia nombradas aquí nos permiten apreciar los efectos de acumular nuestras opciones equivocadas. Pues a pesar de sus altos coeficientes de determinación, y valga el uso sutil del lenguaje, las leyes naturales con 'colas pesadas' son solamente ilusiones falsas e incompletas de lo que es realmente recto. Pues aunque dichas leyes con supuesta potencia son ciertamente notables por su sencillez y universalidad, ellas representan, al final, sólo regresiones grotescas hacia la disipación y el terror que en nada se parecen al estado inmaculado y verdaderamente recto y unido al que estamos llamados.[2,9] Pues es una verdadera tontería el medir el valor de los seres humanos mediante números finitos y el olvidar que somos parte de una hermandad esencial.[15]

Estas lecciones a partir de las leyes de potencia son ciertamente sencillas y nos recuerdan que si abandonamos nuestra consciencia humana, terminamos pagando las justas consecuencias de nuestras avalanchas y cascadas. Pues para resolver los problemas que nos aquejan, debemos empezar por dejar de echarle la culpa a otros, incluido el mismo diablo. Estas ideas, acaso antiguas pero certeras, son pertinentes en estos días en los que aceptamos la indiferencia de los

vientos divisivos como algo 'normal', cuando creemos y nos guiamos por los falsos dogmas de 'la competencia', 'la dominación' y la 'supervivencia del más fuerte', y cuando el estrés natural y las distracciones superfluas de la vida moderna han oscurecido la verdadera razón amorosa de nuestra existencia. ¿Acaso no estamos jugando con fuego al no tener en cuenta la metáfora, antes mencionada y explícita en las leyes de potencia, que una conflagración no sabe cuán grande ha de ser antes de comenzar?

No existe otra manera de hacerlo, debemos regresar a ser como niños, creciendo nuestra verdadera determinación a la unidad 1=0.999... Esto es, maximizando nuestras energías, de modo que nos convirtamos en buenos amigos y podamos jugar juntos. Pues tal y como se muestra en estudios recientes, aún si ellos miden con cierta dificultad lo que intentan cuantificar, el jugar en los mercados del dinero y también del sexo produce leyes de potencia funestas,[16] mientras que la amistad en las redes sociales da lugar más bien a comportamientos exponenciales, definidos por distribuciones gaussianas o normales.[17]

En el mismo espíritu de estas ideas, a continuación se presenta un procedimiento geométrico que intenta capturar la complejidad natural y que permite contrastar aún más las leyes de potencia y la distribución normal y la relación que ellas tienen con la paz.

4. Una Visión Platónica de la Complejidad Natural

La iteración de reglas sencillas definidas en dos o más dimensiones y dando lugar a funciones de una línea a una línea, o de una línea al plano, o de una línea a un volumen, representan la base de un procedimiento determinista que produce patrones complejos tales y como se observan en la naturaleza.18, 19

La Figura 6 muestra un ejemplo de dichas ideas cuando se emplean las dos reglas,

$$w_1\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0.5 & 0\\ 1 & d_1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}, \qquad w_2\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0.5 & 0\\ -1 & d_2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x\\y\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0.5\\ 1\end{pmatrix},$$

cuando ellas se iteran de acuerdo a una moneda cargada con proporción 70-30% y cuando los escalamientos verticales d_n toman los valores $d_n = -d_2 = z = 0.5$.

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

Como se observa, los cálculos, punto por punto, producen una función continua, que va de la línea *x* a la línea *y* , y que luce como el perfil de una montaña. Dicha función es técnicamente el único punto fijo de las dos reglas, y dicho alambre es tal que interpola los tres puntos {(0,0), (0.5,1), (1,0)}. También mostradas en la Figura 6 están las distribuciones inducidas tanto en *x* como en *y* durante el proceso de cálculo, es decir los histogramas *dx* y *dy*, que se relacionan el uno al otro mediante la función mostrada.

Como las reglas empleadas son tales que su coordenada *x* no depende de y y como w_1 opera a la izquierda de 1/2 y w_2 a la derecha de 1/2, los puntos en x están regidos por la cascada multiplicativa anteriormente mostrada en la Figura 3 y *dx* es el mismo objeto multifractal espinoso y eventualmente disipado relacionado con la turbulencia. De otro lado, *dy* depende, de una forma no trivial, de las 'arrugas' del alambre, y está definido como el histograma derivado a partir de dx mediante la función de *x* a *y*.[19]

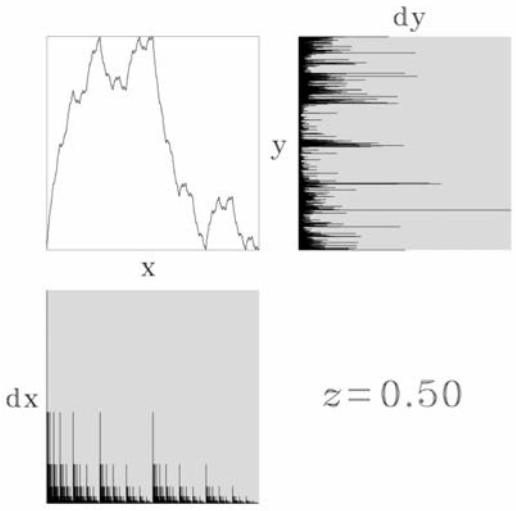


Figura 6. Un procedimiento platónico para modelar la complejidad natural.

Como se puede apreciar, *dy* es claramente intermitente, se parece geométricamente a diversas mediciones de procesos geofísicos y es además tan complejo que parece estar guiado por el azar. Sin embargo, dicho objeto resulta ser un objeto determinista, pues proviene al final, aún si se emplea un método de simulación Monte Carlo para calcularlo, de un par de objetos deterministas, es decir, el multifractal de 'entrada' *dx* y el alambre de *x* a *y*.[18] Como la gráfica de

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

x a y, dependiendo de los escalamientos d_n puede ser un objeto fractal de longitud infinita, cuya dimensión puede ser un número entre 1 y 2 ($D \rightarrow 2$ cuando $|d_1| \rightarrow 1$, $|d_2| \rightarrow 1$), al procedimiento en la Figura 6 que produce a dy como 'salida' se le denomina fractal-multifractal.[19]

Estas ideas esbozan un enfoque platónico de la complejidad natural, pues en el mismo espíritu de la famosa alegoría del cavernícola en La república, lo que observamos como un dy bien puede ser sólo una 'sombra' proveniente de 'realidades' mayores; es decir, el alambre de x a y, y mediante una 'iluminación' adecuada, en este caso dx . Las ideas son también platónicas en un sentido romántico, pues de ellas surge el dilucidar si la complejidad natural puede ser en efecto sólo una sombra producida por alambres e iluminaciones específicas, y esto teniendo en cuenta que dichos conjuntos complejos bien pueden estar plenamente caracterizados por medio de pocos parámetros geométricos.[19]

Para ilustrar que en efecto las ideas producen muchos patrones complejos interesantes, la Figura 7 incluye diversas sombras, técnicamente proyecciones, que provienen de diversos alambres infinitos que tienen dimensiones fractales $D = 1.485$ y que interpolan los puntos $\{(0,0), (0.5, y_1), (1,-0.2)\}$, variando la altura del punto medio y_1, de arriba a abajo, de -0,95 a 0,25 en incrementos de 0,2, y siempre empleando una iluminación multifractal 30-70%.[19] Como puede verse, el procedimiento fractal-multifractal genera objetos con variadas tendencias e intermitencias, y las estadísticas mostradas en sus funciones de auto-correlación y sus espectros de potencia, éstos últimos graficados en escalas doble-logarítmicas que reflejan leyes de potencia con diversos exponentes, son similares a las obtenidas en la naturaleza.

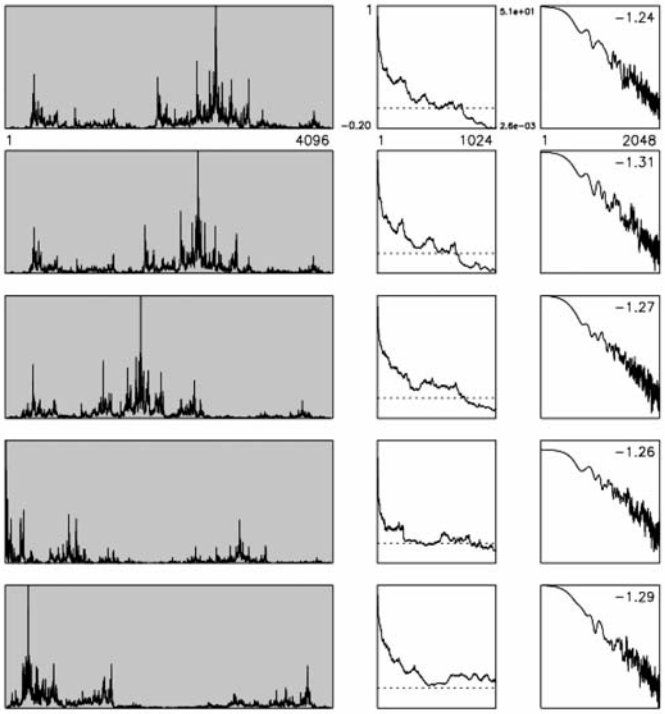


Figura 7. Algunas sombras platónicas y sus estadísticas.[19]

Las ideas se pueden generalizar de manera que la iteración de reglas, igualmente sencillas pero con más coordenadas, produzca un alambre definido, ya sea de una línea a un plano, de *x* a *(y,z)*, o de una línea a un volumen, de *x* a *(y,z,w)*. Esto se logra conservando una estructura desacoplada en la coordenada *x* de las reglas y reemplazando los escalamientos verticales por parámetros adicionales, que en el caso de una línea al plano se pueden expresar en coordenadas polares como

$$D_n = \begin{pmatrix} r_n^{(1)} \cos\theta_n^{(1)} & -r_n^{(2)} \sin\theta_n^{(2)} \\ r_n^{(1)} \sin\theta_n^{(1)} & r_n^{(2)} \cos\theta_n^{(2)} \end{pmatrix}, \qquad n = 1, \ldots, N,$$

donde *N* es el número de reglas a iterar, lo cual puede ser, en general, más de dos.

Al final, estas nociones permiten calcular sombras ya sea sobre el plano *(y,z)* o sobre el volumen *(y,z,w)* y a partir de alambres cuyas dimensiones fractales pueden estar entre 1 y 3 o entre 1 y 4. Tal y como lo ilustra la Figura 8, estas

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

ideas Platónicas generan otros objetos complejos que evocan aquellos encontrados en la naturaleza, tal y como se observa, por ejemplo, en la estructura de un contaminante en el subsuelo.

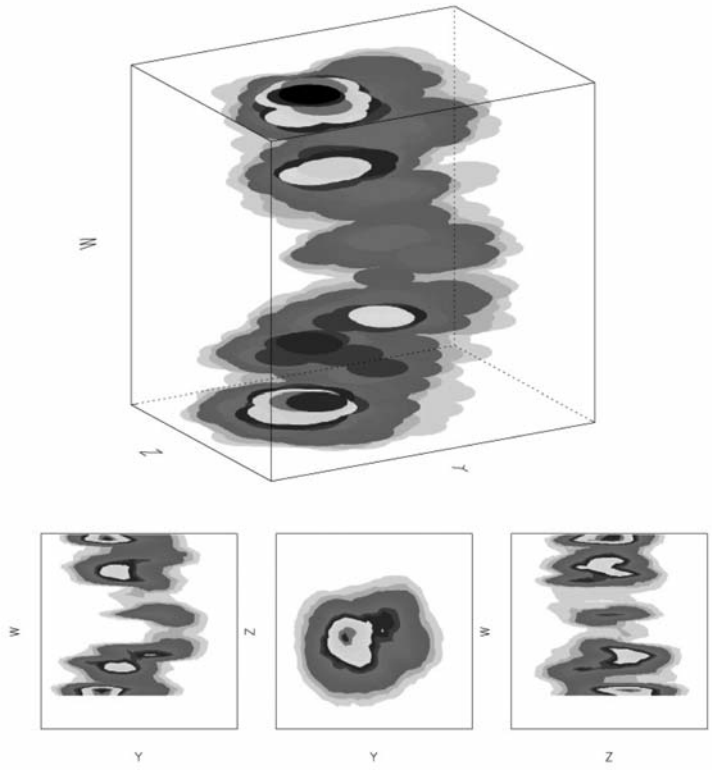


Figura 8. Sombras provenientes de un alambre de x a (y,z,w) uniformemente iluminado.[19]

5. La Campana de Gauss como una Sombra

Cuando un alambre llena más y más espacio, sus crecientes arrugas integran más y más la iluminación inicial y así dan lugar a sombras cada vez menos intermitentes y complejas. Cuando dichas funciones llenan todo el espacio disponible, la integración es máxima y comúnmente se generan, de una forma notable, sombras gaussianas.

Tal y como se ilustra en la Figura 9, para el caso de un alambre de x a y que extiende el caso de la montaña en la Figura 6 con $d_1 = -d_2 = z = 0.999$, en el límite, cuando $D \rightarrow 2$, se halla una sombra lisa, cuya ecuación estandarizada es la misma curva normal $dy(y) = 1/\sqrt{2\pi}\ e^{-y^2/2}$, a partir del mismo multifractal relacionado con la turbulencia.[20]

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

Este resultado resulta ser sorprendentemente universal, pues el mismo alambre máximo infinito ($z \rightarrow 1$) produce campanas como sombras para cualquier iluminación difusa en *x*, es decir, para cualquier entrada no discreta *dx*. Esto implica que se halla una curva normal, no la misma, claro está, para cualquier sesgo de la moneda usada en las iteraciones, y también si se emplean como *dx* una infinidad de iluminaciones que no provienen directamente de cascadas multiplicativas, como por ejemplo, todas las mostradas en la Figura 7 y todas aquellas definidas sobre dominios vacíos cantorianos.[21]

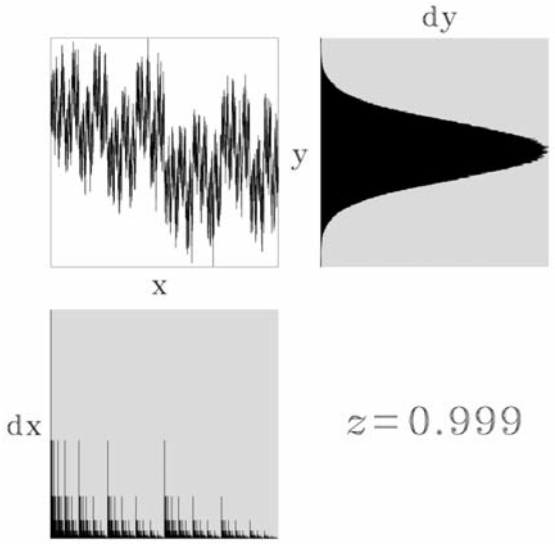


Figura 9. De un multifractal a la campana de Gauss mediante un alambre que llena el plano.[22]

Estos resultados implican que dicho alambre límite provee un puente insospechado y determinista entre el desorden espinoso y polvoriento de cualquier entrada, incluida cualquier ley de potencia en x, y el orden armónico e integrador de la campana.

Tal y como se muestra en la Figura 10, en los casos límite multidimensionales se obtienen típicamente resultados similares. A partir de un multifractal *dx* y mediante un alambre de *x* a (*y,z*), se halla una campana bi-dimensional como sombra sobre (*y,z*).

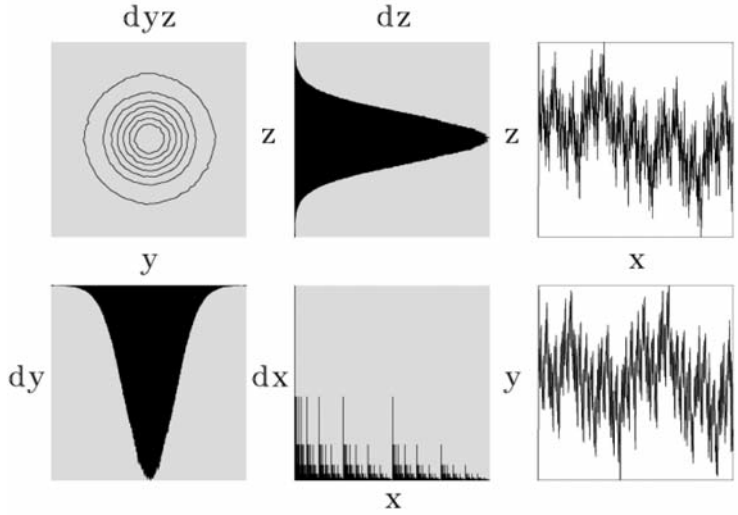


Figura 10. De un multifractal arbitrario a una campana de Gauss bi-dimensional.

Las condiciones que dan lugar a campanas bi-dimensionales, no siempre circulares, se relacionan con las normas de las matrices anteriormente introducidas, D_n, las cuales deben tender nuevamente al valor límite de 1. Esto implica que todos los 'escalamientos' $r_n^{(j)}$ deben tener magnitudes que también tienden a 1 y que los ángulos $\theta_n^{(j)}$ deben estar debidamente acoplados.[20]

Dado que la campana se relaciona con la conducción del calor mediante el proceso de difusión y la ley de Fourier, los alambres de las Figuras 9 y 10 terminan invirtiendo el orden físico prescrito, pues ellos cambian vívidamente la disipación implícita en las cascadas multiplicativas turbulentas por el mantenimiento de la energía y, por ende, transmutan la violencia en la calma. Este es un resultado bello e inesperado que, como se verá más adelante, provee, en un caso aún más sublime, pautas amorosas hacia la paz.

6. La Belleza Exótica dentro de la Campana de Gauss

Como lo mostrado en la Figura 10 y similares es el resumen de iterar las reglas del caso muchas veces, por ejemplo 15 millones, es relevante estudiar cómo se forman los círculos o elipses que conforman la campana en grupos sucesivos de, por ejemplo, 20.000 puntos.

La Figura 11 muestra un ejemplo de lo hallado al iterar dos reglas cuando los ángulos $\theta_n^{(j)}$ son iguales a 60 grados, cuando la magnitud de los escalamientos $r_n^{(j)}$

es igual a 0.9995 y cuando se emplea como entrada una iluminación multifractal 70-30%. En el límite se encuentran descomposiciones exquisitas de la campana bi-dimensional.

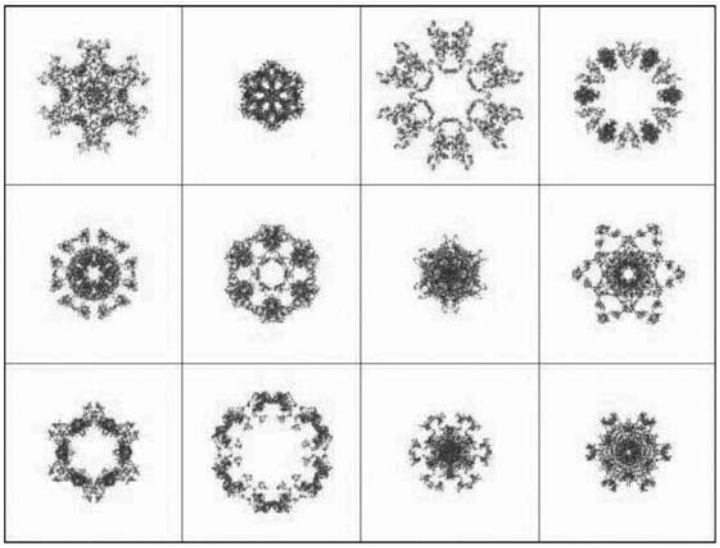


Figura 11. Descomposiciones de la campana de Gauss bi-dimensional. De arriba abajo y de izquierda a derecha.

La imágenes aquí mostradas son sólo un ejemplo de una infinidad de patrones, claramente estéticos, que al superponerse forman círculos perfectos y campanas certeras, cuyas simetrías dependen de los ángulos $\theta_n^{(j)}$ y los signos de los escalamientos $r_n^{(j)}$, y cuyas geometrías específicas e inesperadas dependen de la secuencia precisa empleada en las iteraciones; es decir, de la sucesión obtenida al lanzar la moneda.[20] En el límite central mostrado, y valga la relación con el famoso teorema, existe un orden oculto en el azar que expresa una belleza vital que aparece como viajando 'de gloria en gloria', como una manifestación enamorada que filtra sin dudar cualquier entrada por compleja que sea.

Como lo ilustra la Figura 12, la estructura geométrica de los cristales de hielo se encuentra representada como un diseño dentro de la campana de Gauss. Estos ejemplos fueron hallados rellenando plantillas de cristales conocidos paso a paso, empleando dos reglas con ángulos iguales a 60 grados construyendo secuencias de iteraciones adecuadas a partir de grupos guiados por monedas justas, es decir, con proporciones 50-50%.

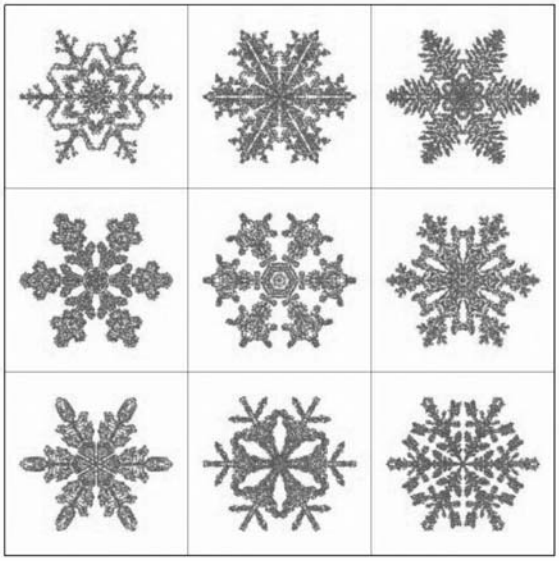


Figura 12. Cristales de hielo en la campana de Gauss bi-dimensional.[20]

Como se puede observar en la Figura 13, la campana contiene, en verdad, una plétora de cristales de hielo, éstos obtenidos empleando los dígitos binarios del número omnipresente π, incluido en la fórmula misma de la curva normal, para guiar las iteraciones. Aquí se observan bellos cristales en forma de estrella y sector que contienen 100.000 puntos, y cuyas formas dependen íntimamente de la secuencia de 0's y 1's empleada. Al final estos cristales, como en la naturaleza, crecen por difusión y como ellos sólo aparecen en el límite en el cual el alambre llena el espacio, se puede decir que ellos nacen sólo en la plenitud de la dimensión.[23]

La campana también incluye, simplemente variando los ángulos, rosetones que se ajustan a diversos compuestos bioquímicos. Prominentemente, el mostrado a la derecha en la Figura 14 se halla empleando dos reglas con ángulos iguales a 36 grados e iterándolas, nuevamente, de acuerdo a la expansión binaria de π. A la izquierda se observa el rosetón con 10 puntas del ADN de la vida. Así, la campana provee un diseño improbable de dicha geometría, uno que depende de la precisa sucesión de los primeros 40.000 bits de π.[20]

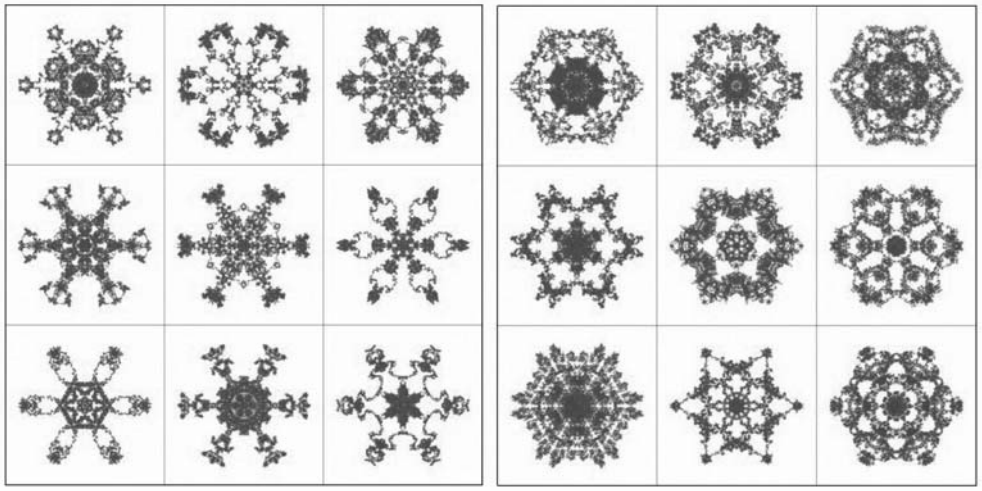


Figura 13. Cristales de hielo en la campana generados por la expansión binaria de π.[23]

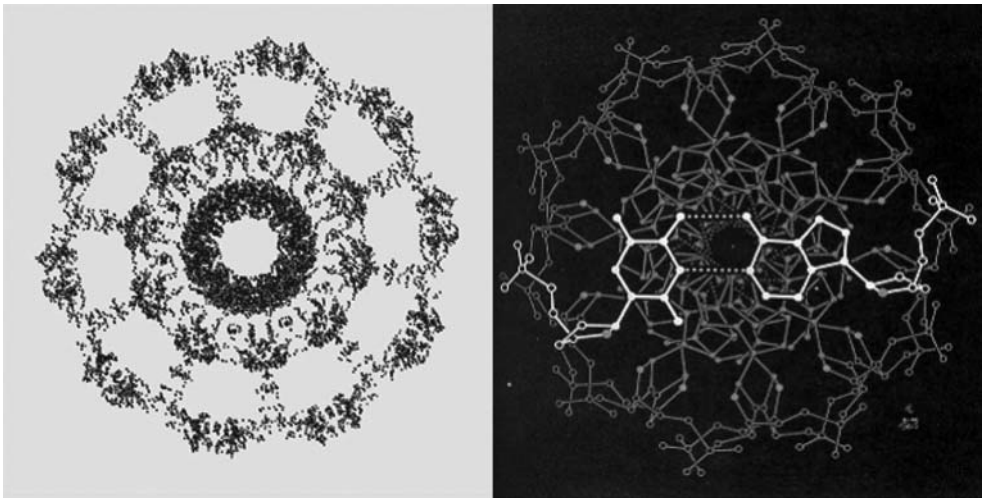


Figura 14. Rosetón del ADN izquierda y una representación dentro de la campana por medio de π.

7. Una Campana Especial para la Paz

Los resultados aquí mostrados con relación a la famosa campana de Gauss son particularmente sugerentes, no sólo por la peculiarmente sencilla transformación que dota una belleza inesperada en los múltiples tesoros geométricos que se encuentran dentro de ella, sino también por su conexión, por medio del célebre teorema del límite central antes mencionado, con los conceptos de integración e independencia.

Ciertamente, el que exista la posibilidad de cambiar las disipadas leyes de potencia en expresiones serenas y conductoras, que además están compuestas por una belleza exótica y juguetona, nos invita a una condición amorosa de unidad y normalidad bien reflejada en inglés por la expresión "to be in cloud 9", la cual se relaciona, por definición, con la paz.

Pero no toda transformación límite resulta ser igualmente provechosa, pues los signos de los escalamientos producen diversos comportamientos como sigue. Para un alambre de x a y , cuando los parámetros d_1 y d_2 son ambos negativos y $-d_1 = -d_2 = z \to 1$, no se encuentra una campana, sino dos que oscilan al poseer dos medias distintas y finitas. Se halla aquí algo que a lo lejos parece ser una única campana pues las varianzas de las dos curvas normales tiende a infinito, pero en este caso, plagado de oscilaciones, no se halla convergencia.[24] Para alambres de x a (y,z) , existen a su vez diversos casos, en función de los signos de los escalamientos $r_n^{(j)}$, que en el límite producen, en función de los ángulos $\theta_n^{(j)}$, no una, sino un número arbitrario de campanas que viajan para siempre siguiendo un polígono regular dentro de un círculo,[24] como órbitas periódicas que no hallan su centro.[3]

Ciertamente, el caso más común corresponde al mostrado en las Figuras 9 y 10 y es la presencia de una campana con medias finitas y las varianzas no normalizadas infinitas, tanto en una dimensión, $d_1 = -d_2 = z \to 1$ ó $-d_1 = d_2 = z \to 1$, como en dos dimensiones, para diversas combinaciones de signos en los escalamientos $r_n^{(j)}$. Pero existen, notablemente, casos que son aún más hermosos, casos que son aún más formidables.

Para alambres de x a y, cuando el parámetro z tiene un efecto positivo en ambas funciones, $d_1 = d_2 = z \to 1$, se halla, tal y como lo muestra la Figura 15 para $z = 0{,}99$, un alambre en forma de nube y no de montaña (o acaso las alas de un ángel), y ahora el límite, construido simplemente mediante adiciones positivas de potencias de $z \to 1$,[25] define universalmente una misma campana que, a pesar de tener nuevamente una varianza infinita, se termina concentrando, con toda probabilidad, en un valor medio en el infinito. Este comportamiento ocurre similarmente en varios casos siempre positivos que pasan por otros puntos en el plano y también para alambres similares de x a (y,z), pues, en este último caso, también existen límites que generan campanas que, aunque no incluyen patrones exóticos dentro de ellas, se concentran singularmente en el punto (∞,∞) para cualquier iluminación difusa dx.[24]

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

Como estos alambres contrastan vívidamente lo positivo y lo negativo, las nubes y las montañas, y lo infinito y lo finito, podemos observar en ellos un antídoto certero de la complejidad en una transformación superior que sirve como un espejo extraordinario en el que podemos apreciar la esencia sin límite de nuestras almas y la razón de nuestros sueños. Pues de una manera mística, esta nube colosal y misericordiosa, conformada por adiciones siempre máximas y unitivas, invita a subir al cielo al son de una campana que expresa la libertad completa, y lo hace con tal fortaleza que filtra todo desorden y anula la entropía de cualquier entrada no-discreta, es decir de cualquiera de nosotros si lo permitimos. ¡Oh santas buenas nuevas las expresadas por dicho alambre angelical!

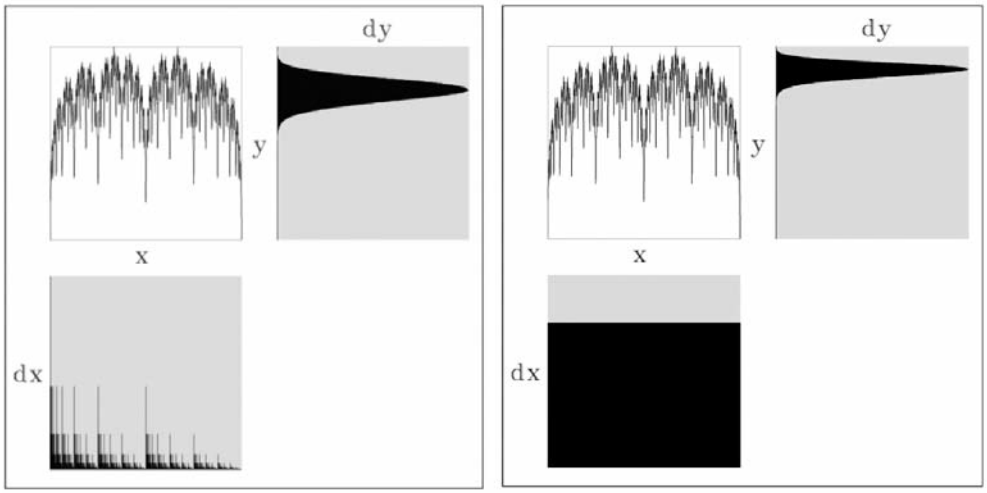


Figura 15. Desde un multifractal y una distribución uniforme a una campana concentrada en el infinito.[26]

¿Cómo no apreciar en ésta transformación imponente, una que milagrosamente transfigura la oscura disipación en una luminosa conducción y que integra toda espina en la campana unitiva, una invitación a lo inefable, a un círculo cerrado en el infinito, a mansiones celestiales? Pues aunque las escaleras del diablo, las leyes de potencia y el caos en general parecen refrendar la falsa afirmación del enemigo común, quien asegura que no hay escapatoria de la disipación de la muerte, en la direccionalidad del diagrama de *x* a *y*, y también en alambres multidimensionales similares, podemos exclamar a partir de un multifractal soportado por el polvo, como en la Figura 15 a la izquierda, "¿dónde está, oh disipación, oh muerte, tu victoria?, ¿dónde está, oh ley de potencia, tu aguijón?"

Al final, y contrario a lo que se observa en muchas redes humanas y en otras redes naturales que son regidas por el desamor, la solución implicada por la cam-

COMPLEXUS *Revista de Complejidad, Ciencia y Estética*
© SINTESYS

pana singular es el camino normal y no perecedero definido nuevamente por la organización no preferencial del amor, ahora expresada por el adagio equivalente "que tu transformación sea positiva y máxima," o dicho de otra manera "que el amor pleno te llene plenamente para que libremente lo puedas compartir con los demás." Pues a partir del triunfo sereno y equitativo obtenido al cortar las montañas y rellenar los valles y que define acumulando una recta hipotenusa con fórmula $X=Y$ y una fehaciente $\sqrt{2}$,[2,3] podemos apreciar una unidad trinitaria, como en la Figura 15 a la derecha, en la que, por la máxima dimensión unitiva del espíritu de amor siempre positivo y sanador, triunfa la vida sobre la muerte, para que nosotros, con debida razón y humildad, alabemos para siempre repitiendo "gloria a Dios en las alturas y en la tierra paz a los hombres en quienes Él se complace."

Para resumir, a continuación se incluye la letra de una poesía-canción.

La transformación

Hay una transformación
ay que vence la agonía,
existe sólo una oblación
ay que enciende la alegría.

Hay una transformación
ay que derrota la entropía,
existe sólo una oblación
ay que engendra la armonía.

Hay una transformación
ay que excluye la rebeldía,
existe sólo una oblación
ay que incita a la poesía.

Hay una transformación
ay que derroca la cobardía,
existe sólo una oblación
ay que regala toda cuantía.

COMPLEXUS Revista de Complejidad, Ciencia y Estética
© SINTESYS

Hay una transformación
ay que es santa sabiduría,
ay mira sólo esa oblación
a la noche vuelve día.

Ay sólo el amor... (3)

Ay te digo verdad
esto no es teoría.

El poder del amor
transforma tu día.

Pero sólo positivo
dejando bobería.

El poder del amor
transforma tu día.

Dota toda potencia
esto no es fantasía.

El poder del amor
transforma tu día.

Pero pleno no más
con toda valentía.

El poder del amor
transforma tu día.

Ay todo puede mira
su canto es letanía.

El poder del amor
transforma tu día.

En toda la unidad
está su compañía.

El poder del amor
transforma tu día.

Ay sólo el amor... (3)

Es todo poderoso
y enciende la alegría.

Ay sólo el amor
te sana y te guía.

Ay todo lo provee
no exige regalía.

Ay sólo el amor
te sana y te guía.

Te lo digo amigo
derrota la entropía.

Ay sólo el amor
te sana y te guía.

Se oye ay su ritmo
trinando todo el día.

Ay sólo el amor
te sana y te guía.

Ay acoge lo de más
como lo hizo María.

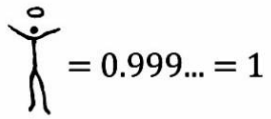
Ay sólo el amor
te sana y te guía.

Es mira fuego eterno
bautizo de poesía.

Ay sólo el amor
te sana y te guía.

Hay una transformación
ay que es santa sabiduría,
ay mira sólo esa oblación
a la noche vuelve día.

Ay sólo el amor... (3)



Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a mis hijas Cristina y Mariana, como testimonio de la fe que fue creciendo al meditar en el trino π, 2 y *e*, especialmente una vez fui providencialmente salvado por la misma campana celestial que los integra.

Referencias y Notas

1. Este trabajo es una versión aumentada de Carlos E. Puente: «Yet more lessons from complexity – Unity: the key of peace», *E:CO*, 8.4 (2006): 104-11, similar a lo presentado en el IV Seminario Bienal Internacional acerca de las Implicaciones Filosóficas, Epistemológicas y Metodológicas de la Teoría de la Complejidad, La Habana, Cuba (2008).
2. Puente, Carlos E.: «Lecciones a partir de la complejidad. La hipotenusa el camino de la paz», *Complexus,* 1.3: (2005) 32-53.
3. Puente, Carlos E.: «Más lecciones a partir de la complejidad. Una parábola perenne y acaso urgente en la teoría del caos», enviado a *Complexus* 11: (2009).
4. Turcotte, Donald L.: *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge University Press, 1997.
5. Buchanan, M.: *Ubiquity*, New York: Crown Publishers, 2001.
6. Malamud, Bruce: «Tail of natural hazards», *Phys. World* 17.8 (2004): 31-35.
7. Di Guilmi, Corrado, Edoardo Gaffeo y Mauro Gallegati: «Power law scaling in the world income distribution», *Econ. Bull.* 15.6 (2003): 1-7.
8. De Soto, Hernando: *The Mystery of Capital*, New York: Basic Books, 2000.
9. Puente, Carlos E.: *La Hipotenusa, Una Parábola Científica Ilustrada para Tiempos Turbulentos*, Author House, 2006.
10. Cederman, Lars-Erik: «Modeling the size of wars: From billiard balls to sandpiles», *Amer. Pol. Sci. Rev.* 97(2003): 135-150.
11. Sornette, Didier: *Critical Phenomena in Natural Sciences*, Springer, 2004.
12. Bak, Per: *How Nature Works*, New York: Copernicus Press, 1996.
13. Watts, Duncan J.: *Six Degrees: The Science of a Connected Age*, New York: W. W. Norton, 2003.

14. El algoritmo requerido para hallar el número *e*, el cual simboliza por su dirección un espiral positivo y amoroso como el número 9, se halla mediante el límite $(1 + 1/x)^x$ cuando tiende a infinito, tal y como aparece en la famosa alegoría de la vid y los sarmientos, es decir y , en el capítulo 15 del Evangelio según San Juan.

15. La auto-organización crítica en inglés está dada por la sigla SOC, "self-organized criticality". Cuando se aplica dicho término a nosotros los humanos debería más bien llamarse SOS, "self-organized stupidity", pues así se reflejarían mejor nuestras adicciones y nuestras necesidades.

16. Liljeros, Fredrik; Christofer R. Edlin; Luís. A. Nunes Amaral; H. Eugene Stanley e Yvonne Åberg: «The web of sexual contacts», *Nature* 411 (2001): 907-908.

17. Nunes Amaral, Luís A.; A. Scala; M. Barthélémy y H. Eugene Stanley: «Classes of small-world networks», *PNAS* 97.21(2000): 11149-11152.

18. Barnsley, Michael F.: *Fractals Everywhere*, Academic Press, 1988.

19. Puente, Carlos E.: «A universe of projections: may Plato be right?» *Chaos, Solitons Fractals* 19 (2004) : 241-253.

20. Puente, Carlos E.: *Treasures Inside the Bell*, World Scientific, 2003.

21. Puente, Carlos E.; M. M. López; J. E. Pinzón y J. M. Angulo, «The Gaussian distribution revisited», *Advances in applied probability* 28.2 (1996): 500-524.

22. La figura mostrada comprime verticalmente el alambre y la campana en un factor de 64, pues el rango del alambre es [-31.6, 32.4].

23. Puente, Carlos E. y M. G. Puente: «Ice crystals inside the bell», *Visual Math*. 6.1: (2004).

24. Puente, Carlos E.; A. Cortis y B. Sivakumar: «Bells galore: Oscillations and circle-map dynamics in space-filling fractal functions», *Fractals* 16.4 (2008): 367-378.

25. La transformación de la Figura 15 pasa por los puntos genéricos (0,0), (1/2,1) y (1,0). Los demás puntos de dicha 'nube' se hallan como sigue. Primero se unen los tres puntos y se generan otros dos subiendo z a partir de los puntos medios de dichas líneas. Luego se unen estos cinco puntos de izquierda a derecha y se obtienen otros cuatro a partir de los puntos medios de dichas líneas subiendo z^2. El procedimiento se repite ad infinitum siempre subiendo y en potencias de z y de modo que $z \to 1$.

26. El alambre y las campanas están altamente comprimidos. La escala vertical del alambre es 57 veces más grande que la horizontal. La campana a partir de la distribución uniforme tiene una escala 11.5 veces más grande que la de la distribución uniforme y la campana a partir del multifractal es 3 veces más pequeña que el valor máximo del multifractal, cuya escala es 21 veces más grande que la de la distribución uniforme.