

La biosemiótica: un paradigma de la biología*

Señalización biológica al borde del caos determinístico

J. Eder y H. Rembold

Traducción de Gertrudis Payás

*En la ciencia, toda idea nueva pasa por tres etapas.
Al principio nadie la cree, después, la creen pero
no le dan importancia; y finalmente la creen, le dan
importancia, pero dicen que no es nueva.*

Michael de Montaigne

La bioquímica parte de la química biorgánica de las sustancias naturales, luego evoluciona hacia el examen de los aspectos dinámicos del metabolismo y finalmente conduce a la apoteosis de la biología molecular de hoy día. Sus éxitos y logros¹ confirman que evidentemente existe una "lógica molecular de los organismos vivos".² También explican el papel dominante del paradigma molecular dentro de las ciencias biológicas. Hay que señalar que el reduccionismo³⁻⁵ como preconcepción filosófica que hizo escuela, se encuentra en la raíz misma de este impresionante avance.

El enfoque molecular se ha considerado a menudo como una especie de llave universal para entender los fenómenos esenciales de la vida. Sin embargo, este optimismo demasiado entusiasta se está desvaneciendo,⁶ debido sobre todo a que no se ha encontrado respuesta a muchas preguntas. La mayoría de éstas son parte de los objetivos esenciales de la biología como ciencia autónoma, por ejemplo algunos fenómenos de gran complejidad e integración como la regulación dentro de las redes bioquímicas o las interacciones ecológicas, o bien la autoorganización, el desarrollo, la morfogénesis, y —como sello distintivo de la vida— la biodiversidad. Crece un cierto temor de que la

biología molecular, por los problemas ya mencionados, puede no cumplir sus promesas.⁷ El blanco principal de la crítica es una actitud reduccionista que parece ser la filosofía determinante tras la perspectiva molecular de la biología.⁸

En muchas publicaciones de áreas tan distintas como biología celular, entomología o ecología se describe la comunicación dentro de los sistemas vivos, y entre unos y otros. En su mayoría insisten en dar un enfoque puramente molecular al estudio de las señales y sistemas de señales. Sin embargo, en nuestras investigaciones sobre interacciones químicas en sociedades de insectos, entre insectos y plantas, y en sistemas de huésped-parásito, nos hemos convencido de que el intercambio de señales en el complejo nivel de organismos intactos escapa curiosamente a un enfoque exclusivamente molecular. Una tendencia similar, aún dispersa, se percibe en las publicaciones provenientes de otros campos en los que parece surgir una doctrina autónoma de señales. Cada vez se hace más hincapié en la idea de que la interconexión por medio de señales constituye una idea omnimoda de la biología y un criterio esencial de la vida que debería estudiarse por derecho propio. Teniendo en cuenta que las señales parecen impregnar toda la biología, y considerando la nueva cualidad atribuida a este fenómeno, intentamos proponer a la *biosemiótica* como marco integrador y como paradigma. Parece que hemos llegado al punto en que al paradigma molecular debe sumársele otro paradigma complementario.

La primera parte de esta publicación se concibe como reseña. Inevitablemente incompleta, hace un bosquejo del desarrollo de un concepto semiótico dentro de las ciencias biológicas. En la segunda, la biosemiótica se define como un concep-

* Versión ampliada de un documento presentado por H. Rembold en la 22a. Conferencia Etológica Internacional, Kyoto, 22-29 de agosto de 1991.

to fundamental y un marco omnímodo que integrará una amplia gama de fenómenos biológicos que hasta el momento parecen totalmente inconexos. Se mencionará brevemente como un punto importante la cercanía del mundo biosemiótico con el caos determinístico. En la tercera sección, se presenta un panorama que explica que la biosemiótica no es sólo una disciplina más, sino toda una empresa interdisciplinaria y casi una filosofía. Al no restringirse únicamente a los horizontes de la biología molecular, revelará un rostro nuevo de la verdad científica y contribuirá a una pluralización de la biología que se avecina.

La biosemiótica como concepto

La semiótica se originó como una rama de las humanidades con un pronunciado sesgo lingüístico. Sus fundadores ya eran conscientes de que este término podía aplicarse a cualquier sistema de signos y señales. Los primeros intentos de aplicar los conceptos semióticos a las ciencias biológicas estaban demasiado adelantados para su tiempo y no cuajaron hasta que surgió un interés renovado por los procesos mediados por signos. En las publicaciones recientes aparece una y otra vez la tendencia a definir los procesos biológicos como comunicación mediada por signos y a estudiarlos a la luz de este aspecto universal. Difundido de manera muy ubicua, está evidentemente a la espera de poderse verbalizar y concretar precisamente en el sistema coherente e integrador que tan necesario es para la biología.

La semiótica: una doctrina de signos y señales

El tema central de la semiótica es, sencillamente, los mensajes y sus significados. Dado que todo mensaje se compone de signos, la semiótica es la doctrina de los signos y por ello forma parte de la lingüística.

En el hombre, el lenguaje es el sistema de señales por excelencia y el sello distintivo de lo humano; y la semiótica intenta crear un lenguaje para hablar de signos y de universales del lenguaje. La semiótica ofrece una base para la interpretación de lenguajes formalizados así como una teoría de códigos, y utiliza estudios comparativos

de gramática para obtener información sobre la genealogía del lenguaje.

En las humanidades, John Locke, a finales del siglo xvii, fue quien introdujo el término *semiótica* en el discurso filosófico. Sin embargo, el auténtico fundador y primer investigador sistemático del área fue el filósofo estadounidense C. S. Peirce, en la primera mitad de nuestro siglo. Fue útil la propuesta de C. W. Morris⁹ de subdividir la semiótica en sintaxis, semántica y pragmática, además de que fue uno de los primeros en subrayar el extraordinario carácter omnímodo de la semiótica como *organon o instrumento de todas las ciencias*. Aparte de la semiótica pura, que desarrolla una terminología científica apropiada para el mundo de los significados, la semiótica puede aplicarse a todo sistema de signos y señales.^{10, 11} La conciencia de su potencial como herramienta integradora está ganando cada vez más terreno en las ciencias biológicas. La semiótica, como disciplina científica, es un fenómeno intelectual vigoroso. De paso mencionaremos la cibernética y la teoría de sistema como áreas afines.

La biología como semiótica natural

*Este universo está impregnado por signos.*¹² Ya en 1934, la frase visionaria de C.S. Peirce anticipó un logro moderno fascinante: en la actualidad, en todas las ciencias biológicas está por surgir un contexto general de la semiótica y una concepción del significado que no son privativos del hombre. El criterio básico de la vida —que la biología molecular no ha logrado captar— reside en las relaciones sistémicas¹³ y en la intrincada red de interdependencias y comunicaciones interactivas entre todas las actividades que la componen. Los sistemas biológicos no son un mero conjunto de componentes sin relación; están en esencia determinados por la información¹⁴ y, por lo tanto, por la dinámica semiótica de signo y señal. Estar vivo es una propiedad de los sistemas, es decir, una característica que sólo puede atribuirse a entidades organizadas. Sin embargo, los problemas de la teoría de sistemas son siempre problemas semióticos.¹⁵

En las últimas décadas, como se han realizado varios intentos por incorporar de lleno el aparato

conceptual de la antroposemiótica a las ciencias biológicas¹⁶, la biología se ha visto cada vez más invadida por el *lenguaje del lenguaje*. Sin embargo, la mayoría de estos intentos ha pasado desapercibida y no han sido más que una iniciativa aislada. Hoy en día parece que este descuido se debe virtualmente a la importancia para una descripción y una perspectiva cuyo momento todavía no había llegado y cuyo posible impacto, por lo tanto, era invisible en aquel entonces. Por medio de conceptos asociados con la cibernética y la información, N. Wiener¹⁷ ha estado haciendo comparaciones entre un organismo y un lenguaje. En medicina, el término *semiótica* se emplea para designar una doctrina de síntomas que señalan la existencia de una enfermedad.¹⁸ A raíz de la exportación de conceptos semióticos, se han creado un sinfín de términos especiales, por ejemplo, *citosemiótica*,¹⁹ *fitosemiótica*,^{19, 20} *zoosemiótica*,²¹ *inmunosemiótica*,²² *endosemiótica*²³ y *protosemiótica*.¹⁵

Dentro de todo este despliegue de semióticas, la inmunosemiótica debería tratarse por separado. Acuñado durante los preparativos de un *simposium*,²² este término, y el concepto subyacente, se concibieron como un enfoque que podría desembarazar la intrincada comunicación entre linfocitos. Se puso de manifiesto que la interacción de células en el sistema inmune era efectivamente el terreno idóneo para la aplicación de los amplios métodos del análisis semiótico a un problema actual en el reconocimiento biológico. Cosa curiosa, esta empresa interdisciplinaria se ha llegado a definir como *la inmunología al rescate de la semiótica*.²⁴ Cabe citar en este momento la teoría de red idiotípica de N. Jerne como la opinión unificadora que se sitúa entre la inmunología y la semiótica, y que puede describir al sistema inmune como una unidad centrada en organismos autorreferentes.²⁵ Su flexibilidad puede considerarse como la *gramática generativa del sistema inmune*. Otra analogía entre las descripciones del lenguaje y del sistema inmune compara *lo abierto de la gramática generativa* de N. Chomsky²⁶ con *lo concluso del repertorio de anticuerpos*.²⁷

Las interacciones semióticas, incluidas emisión, reconocimiento e interpretación profunda de señales, se dan de manera ubicua y en todos los

niveles de vida. La comunicación puede estar mediada por canales auditivos, visuales, químicos y táctiles.²⁸ De acuerdo con el punto de vista de que las funciones biológicas a fin de cuentas serán explicadas sobre la base de eventos mediados por signos (es decir, a un nivel que incluye y a la vez trasciende a la biología molecular) podría resultar que un organismo pueda definirse de manera distintiva por medio de un número suficientemente grande de interacciones —la biología, en sí misma y en todos sus aspectos, es semiótica natural.²⁹

Estas ideas, al igual que todas las ramificaciones biológicas de la semiótica que se han mencionado hasta el momento y que coexisten hasta hoy, convergen en la biosemiótica, que se concibe como un concepto integrador tanto como una nueva perspectiva. La creación de la biosemiótica debe verse primordialmente como un suceso concentrador. Su objeto central son las relaciones semióticas de todo sistema comunicativo, basado en el reconocimiento, en células, plantas y animales.¹⁵ Abarca, por ejemplo, las interacciones puramente moleculares de la protosemiótica, las señales en la bioquímica celular, la homeostasis de organismos intactos al igual que las relaciones intra e interespecies dentro de los ecosistemas.¹⁵ Además, tendrá que adaptar los métodos, las definiciones y las terminologías de la semiótica pura a un contexto biosemiótico más amplio. Un aspecto importante es que la biosemiótica se ocupará de los sistemas de signos no lineales y dinámicos, en los que explícitamente se funden energía e información. Para facilitar un enfoque experimental T. S. Sebeok³⁰ propone que un evento biosemiótico puede ser subdividido en seis factores: fuente, canal (visual, químico, etc.), destino, có-



digo, mensaje y contexto. Otra función especial será también redefinir y reevaluar los conceptos generales de la semiótica, por ejemplo, *signo* o *significado* dentro de un contexto biológico. Un *signo* es algo que equivale a otra cosa en el marco de un lenguaje.

La cualidad de ser signo existe sólo en función de un sistema de significado. Una molécula es un antígeno, una hormona, o una feromona sólo en función, respectivamente, de un sistema inmune, endocrino, o de una relación intraespecie. No existe un signo *absoluto*. En todos estos casos se establece claramente una relación específica entre un lector y su signo. Esta relación consiste en una interpretación, es decir que un signo sólo puede definirse respecto a un código determinado. La lectura de signos químicos, por ejemplo, supone una selección estructura-antiestructura por medio de receptores concretos. Al extender la definición de *significado* dándole connotaciones biológicas, puede decirse, por ejemplo, que el significado del ADN es el organismo que surge de él. Desde el punto de vista biosemiótico, esta declaración disipa la convención errónea de que el ADN es un anteproyecto, un conjunto de planos en correspondencia directa con el organismo en construcción. En cambio, ilustra y subraya la relación no sólo entre significado y ADN, sino también entre significado y un universo de otros tipos de información biológica. Sólo en el contexto químico y en el medio ambiente bioquímico adecuados, presentes *a priori*, el significado del ADN puede desplegarse y traducirse en un organismo. El *significado*, como concepto semiótico, reúne estos diversos tipos de información en un impecable atado conceptual. La comprensión de esta relación

pone en relieve y postula muy imperiosamente el uso del *lenguaje del lenguaje* en la descripción de los sistemas biológicos.

Hace unos años que se oye hablar de biosemiótica.^{15, 29} M. Florkin, en su capítulo sobre biosemiótica,³¹ por un lado prevé que las interacciones semióticas a nivel de ecosistema serán un problema para el futuro, y por otro hace hincapié en que la *protosemiótica* es un método de estudio para los fenómenos cuasisemióticos en la interacción de átomos y moléculas. T. A. Sebeok, que como lingüista y semiólogo indiscutiblemente tiene una marcada orientación biológica, es un partidario acérrimo de la biosemiótica. Cree que la dinámica de la semiosis constituye nada menos que la propiedad crucial que define toda la vida. La perspectiva más atractiva que destaca en todas las publicaciones de Sebeok es la visión de una ciencia de signos auténticamente comparativa, que abarca ejemplos tan únicos y especiales como el lenguaje del ser humano y la comunicación química a nivel de sociedades de insectos. Pese a lo poco revelador de su título, *La comunicación animal*,³² una obra editada por él, contiene una serie de análisis en los que predomina abiertamente un punto de vista biosemiótico. En otros escritos,^{30, 33, 34} la *zoosemiótica* se propone como un área de investigación que abarca tanto la zoología como la semiótica.

Ya en 1971, Law y Regnier³⁵ proponen el término *semioquímico* para los compuestos que median interacciones entre organismos. En 1891 se dio también el título *Semioquímicos*³⁶ a una monografía, y en un *simposium* celebrado en 1989 la expresión clave era *moléculas señal*.³⁶ Hoy día arraigados ya en la jerga científica, estos neologismos demuestran que la señal química se reconoce y se entiende como un fenómeno general. Por último, debemos citar la *Biokommunikation* de G. Tembrock³⁸ que es totalmente biosemiótica en su contenido y en su filosofía.

La biosemiótica como perspectiva

Una característica atractiva de la biosemiótica es su potencial integrador. En primer lugar, constituye un puente intelectual entre la biología molecular y la organísmica,³⁹ ciencias divergentes. En



segundo lugar, una semiótica general proporciona una justificación para reintegrar ciencia y humanidades en una síntesis superior propia de una doctrina de signos. En tercer lugar, y lo que es más importante, la biología tendrá como paradigma esencial una doctrina biosemiótica general. Surge como iniciativa de gran empuje y visión de futuro, y permitirá el estudio de los fenómenos biológicos dentro de su estructura jerárquica y contexto pertinentes. La bioquímica y la biología molecular nos proporcionan un extenso muestrario de moléculas. Ahora bien, necesitamos urgentemente el patrón de su contexto. Una enorme gama de fenómenos biológicos que hasta el momento parecen inaccesibles, inconexos o incompatibles serán integrados en un marco teórico unificador. Hoy día, la biología, en todos los niveles, puede verse y estudiarse como comunicación. Sin embargo, la biosemiótica no es sólo un concepto unificador sino también una nueva perspectiva incitante para problemas como la complejidad, la diversidad y la interconexión. Al impregnar toda la biología, la señal es una clave viable para entender la vida.

Complejidad, diversidad e interconexión Retos para la biosemiótica

La complejidad, por ejemplo, de un organismo proviene no sólo del número y la diversidad de sus componentes moleculares, sino, sobre todo, de sus interacciones sumamente organizadas, reguladas y —a menudo— impredecibles, y de las interconexiones entre ellas. Por lo tanto, una biología que se centra deliberadamente en el organismo^{40,41} cae precisamente en el ámbito de la biosemiótica y ésta debería estimularla. La mayor parte de las interrogantes no resueltas de inmunología y neurología remiten a procesos determinados por señales, y por esta razón también deben estudiarse dentro de este contexto. El sistema inmune y el sistema nervioso, al ser autorreferentes dentro de una estructura de red, representan, cada uno por su parte, un reto específico para la biosemiótica.

La biodiversidad. Dentro del ámbito actual de las ciencias biológicas, gran parte de la comuni-



dad científica no comprende bien la diversidad, y la subestima.⁴² El meollo filosófico del reduccionismo destaca el carácter unitario de todos los fenómenos biológicos y precisamente por eso es incapaz de dar valor a la biodiversidad. Las teorías físicas de la vida por lo general han restado importancia a la biodiversidad: *Ésta es la era de la generalidad —la diversidad no está de moda.*⁴³ Sin embargo, a medida que los biólogos se especializan en grupos particulares de organismos,⁴⁴ parecen destinados a converger en la biosemiótica como lenguaje y metodología comunes. Cuanto más profunda sea la exploración en las relaciones semióticas más rápidamente se reconocerá que la diversidad es un sello distintivo de vida cuyo tema dominante es la pluralización de la red biosemiótica. Al seleccionar determinados grupos taxonómicos o especies para estudiar el intercambio de señales a través de todos los niveles de organización y dentro de cada uno de ellos, cada clase de animal tendrá a su disposición un repertorio de signos que constituye un sistema que le es propio o, dicho en jerga biológica, especie-específico. Se propuso el término “etograma”,³⁰ como una verbalización útil, para designar la imagen coherente de todos los eventos y relaciones biosemióticas de una especie.

El enfoque explicativo de la biosemiótica se centrará en las propiedades sistémicas, es decir, en señales y relaciones semióticas, y no se basará sólo en detalles moleculares. Este esperado renacimiento de la biodiversidad⁴⁵ abarcará sin duda la sistemática y la taxonomía,⁴⁶ o como lo ha dicho E.O. Wibon, *el futuro de la investigación biológica básica está en gran medida en la exploración de la diversidad.*



La interconexión. De acuerdo con su filosofía subyacente, la biosemiótica es pertinente también para la protosemiótica y la homeostasis en niveles inferiores de organización. Sin embargo, al pertenecer a una perspectiva orientada hacia los afloramientos, su preocupación principal debería situarse en el intercambio de señales en los niveles superiores de integración como son las relaciones intra e interespecies. Dentro de este contexto, la simbiosis, el mutualismo, el comensalismo y las relaciones presa-depredador precisan o se prestan a una interpretación semiótica. El mimetismo biológico también se vale de señales de adaptación para proteger a un organismo de sus enemigos. En materia ecológica, el estudio de la sociabilidad de insectos, y de las relaciones insecto-planta y huésped-parásito constituirá un reto especial para la biosemiótica.

Insectos sociales. Los insectos sociales son el modelo por excelencia en un paradigma biosemiótico. En varias ocasiones, a lo largo de la evolución, la conducta social ha aflorado. Las sociedades de insectos constituyen la apoteosis de la integración biológica. En retrospectiva, su configuración resulta ser una de las ideas más ingeniosas de la naturaleza en el camino hacia la sociabilidad.⁴⁷ Los aspectos semióticos se encuentran en el núcleo de cualquier agrupación social, y la organización social se basa siempre en cierto tipo de comunicación mediada por lenguaje. Ahora bien, cabe preguntarse si el lenguaje es parte de la sociedad o si la sociedad es parte del lenguaje.³⁰ La respuesta debe ser que el problema de la sociabilidad de los insectos debería abordarse desde ambos flancos, es decir, con el semiólogo y el

entomólogo trabajando en estrecha colaboración. Dentro de los lenguajes y dialectos usados por las sociedades de insectos, el lenguaje químico resulta ser un lenguaje universal, aspecto que ya ha sido tomado en cuenta en el término *químio-sociabilidad*.⁴⁸

En las hormigas, abejas, avispa y termitas, la mayor parte de las conductas no tienen significado alguno salvo cuando encajan en un patrón completo de interacciones semióticas entre miembros de la colonia. Este imperio de hexápodos conserva su unidad por comunicación química. Se emplean diversas combinaciones de señales químicas y táctiles para actuar como reclamos, para la identificación de parentesco, para estrategias de búsqueda de alimento, etc. Al estudiar las sociedades de insectos, puede que terminemos por darnos cuenta de que estamos tan sólo empezando a comprender las moléculas señal como son las feromonas y los aleloquímicos, y que estamos aún muy lejos de llegar al término del camino.

Una organización social como es el caso de una colonia de hormigas puede desarrollar propiedades de un sistema cognitivo para resolver problemas que trascienden la capacidad de los individuos por separado. En su jerarquía hay un alto grado de interconexión o densidad en el sentido de que los individuos son susceptibles de comunicarse individualmente entre sí.

Las hormigas forrajeras, por ejemplo, se encargan de cubrir la necesidad generalizada de alimentos por medio de un sistema de relevos basado en la comunicación de masas. El *lenguaje* que se utiliza comprende espirales de retroalimentación que van desde las unidades de organización inferiores a las superiores. Las espirales crean patrones que afloran únicamente a nivel de la colonia, y que son difíciles de predecir si se parte sólo del conocimiento de la conducta individual.⁴⁹

Las abejas productoras de miel representan sin lugar a dudas la apoteosis de la químiosociabilidad. Se ha demostrado que una gran variedad de modos conductuales se regula con señales feromonales que tienen su origen en diversas glándulas exocrinas de las obreras o de la reina. El sistema de castas, sobre todo, y la división del trabajo resultante hacen gala de una elegancia comunica-

tiva que apunta hacia un estrecho vínculo entre las estructuras biosemióticas y la organización social.^{50,51}

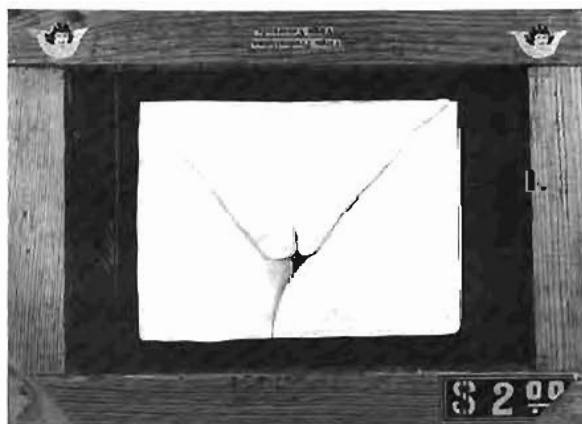
Relaciones insecto-planta. Dentro del contexto de la comunicación química interespecífica, las relaciones mediadas por signos entre los insectos fitófagos y sus plantas huésped representan un tema sumamente gratificante. En el transcurso de la coevolución insecto-planta, algunas plantas han aprendido a protegerse por medio de semioquímicos que pueden estudiarse con una perspectiva biosemiótica. Las sustancias repelentes en los exudados de hoja son señales de contacto o que se perciben a distancia. Al modificar la conducta de los insectos plaga, son factores de resistencia y contribuyen a una protección parcial de la planta huésped.⁵² Las plantas de cultivo y sus plagas suelen situarse en condiciones agroclimáticas variables y responden a su manera a estos factores de tensión. La aparición de las queromonas fue un avance importante en favor de los insectos. Las indicaciones olfativas de los volátiles de las plantas son importantes señales que guían al insecto hacia su planta huésped.⁵³ A falta de una orientación visual, se hacen esenciales para los insectos fitófagos nocturnos y en algunas ocasiones parecen controlar la reproducción de estos últimos.

Interacciones huésped-parásito. La enfermedad de Chagas es causada por un flagelado parásito, el *Trypanosoma cruzi*, que se desarrolla y reproduce en un insecto como huésped intermedio. La relación huésped-parásito entre el chupasangre, *Rhodnius prolixus* y el *T. cruzi* es un fenómeno claramente biosemiótico, en el que las hormonas del insecto y sus cambios titulares actúan como señales. En un insecto sano, éstas regulan su desarrollo. En uno parasitado, en cambio, parece controlar también al parásito, de tal forma que el *T. cruzi* depende de que la regulación endocrina de su huésped esté fisiológicamente balanceada y sincronizada. El Azadirachtin⁵⁴ es un metabolito de plantas que afecta al sistema hormonal del insecto. Sin embargo, al hacerlo también altera de forma perdurable el ajuste tan cuidadosamente sincronizado entre el parásito y su huésped intermedio. Al tratar a un insecto con Azadirachtin se

le afecta de tal manera que pierde su identidad biosemiótica y, por lo mismo, ya no es atractivo ni viable para el parásito.⁵⁵ La señal perdida y el fundamento bioquímico de este fenómeno todavía no se conocen. Estudiarlos dentro del paradigma biosemiótico puede guiarnos hacia los métodos para combatir otras enfermedades causadas por tripanosomas.

El hecho de presentar un concepto biosemiótico general en este momento parece tener tres ventajas significativas. La primera es que una gran cantidad de información hasta ahora inconexa, al igual que proyectos de investigación aislados se unificarán debido al potencial integrador que tiene la perspectiva biosemiótica. La segunda es que con una especie de retrospectiva conceptualizadora, los resultados y logros anteriores pueden reinterpretarse a la luz de la semiótica. La tercera, y la más importante, es que de la nueva forma de lo habitual surgirán sin lugar a dudas nuevos e ques experimentales.

Un gran número de problemas y áreas de investigación existentes se presta a ser examinado, estudiado e interpretado con la biosemiótica. Entre ellos destacaremos⁵⁶ las cascadas de señales intracelulares vinculadas a la acción hormonal y a los sistemas de segundo mensajero, señalización hormonal en general, formación de patrones, autoorganización y morfogénesis, células nerviosas y redes neurales, conversión de señales basadas en oscilaciones de calcio, reacciones de oscilación en general, redes inmunológicas, comunicación intercelular en el *Dictyostelium* y propagación de señales en el corazón. Como ya se indicó, el estudio biosemiótico se centrará en los niveles superiores de integración.



La biosemiótica y el extraño mundo del caos

Hasta hace poco la ciencia se fundaba en el supuesto de que el mundo físico estaba ordenado y gobernado esencialmente por la causalidad y el determinismo. Luego, como una derivación de la física clásica y de las matemáticas de la era de las computadoras surge la teoría del caos como una de las áreas más interesantes y enigmáticas de la ciencia en los últimos treinta años.^{57, 58} La detección del caos en los sistemas determinísticos está por establecer una nueva doctrina de interconexiones y dar una respuesta inesperada a la vieja cuestión de la previsibilidad. El conocimiento acucioso del caos determinístico influirá de manera profunda en todos los conceptos científicos de la naturaleza en general.⁵⁹ Sin embargo, la ciencia de lo no lineal por excelencia es la biología. Aquí, el campo de la dinámica no lineal tiene implicaciones especialmente interesantes y la teoría del caos está empezando a arrojar una prodigiosa luz sobre fenómenos antes inexplicados.⁶⁰ Puede que surja una conducta caótica e impredecible al igual que una sensibilidad pronunciada a condiciones iniciales en sistemas y procesos que son sumamente complejos, irreversibles, y que distan del equilibrio, que poseen espirales de retroalimentación y que, por estos motivos, tienden a una conducta errática y sólo pueden entenderse en función de su historia. En tales sistemas, las cadenas causales no pueden ser rastreadas más allá de un punto terminal debido a que se pierden en la insondable complejidad del organismo. La siguiente selección de ejemplos ilustra que los procesos no lineales no son en absoluto excepcionales en biología. Al contrario, son ubicuos y representan una característica esencial de la vida.

- En medicina y fisiología, los procesos iterativos que comprenden ritmos fractales parecen ser normales. El ritmo de un corazón sano y la actividad de un cerebro sano son caóticos. Los resultados actuales indican que las enfermedades dinámicas como las fallas en ritmos cardíacos y el camino hacia una muerte súbita no son una bifurcación del caos fisiológico, sino que se caracterizan por una pérdida de la variabilidad fractal del ritmo cardíaco. Las periodicidades patológicas sumadas a una pérdida del equilibrio entre orden y

variabilidad también son características del proceso de envejecimiento. En el cerebro, la actividad caótica autocontrolada en la que participan millones de neuronas parece esencial para la percepción y el reconocimiento rápidos.⁶¹ Recientemente hemos asociado algunos trastornos, como la epilepsia y la esquizofrenia, con una pérdida de flexibilidad caótica en el cerebro.⁶²

- Los biólogos también perciben caos en las cambiantes poblaciones de animales. Las fluctuaciones irregulares, que siempre fueron difíciles de explicar, ahora pueden describirse con las matemáticas no lineales.⁶³

- La evolución biológica requiere variabilidad genética. El caos proporciona un medio para estructurar los cambios fortuitos con lo que pone a la variabilidad bajo el control de la evolución.

- Una presa que escapa al ataque de su depredador puede emplear el control de vuelo caótico como factor sorpresa para evitar la captura.

- En múltiples especies de mamíferos, el modelo de ramificación irregular de las estructuras anatómicas, por ejemplo, el árbol bronquial, es congruente con un proceso de autosemejanza morfogenética descrita en la escala de Fibonacci.

- El caos determinístico es pertinente para la dinámica de las reacciones oscilatorias que se observan en cualquier nivel de organización biológica y que pueden volverse caóticas porque poseen un elemento de retroalimentación. Las oscilaciones son importantes, por ejemplo, para la glicólisis en las funciones del reloj biológico, en la transmisión de señales intra e intercelulares, y en la diferenciación celular.^{64, 65}

- La naturaleza emplea también el caos de manera constructiva. Según las leyes de la termodinámica, el orden no debería provenir del caos. En vista de la autorganización biológica —que también es tema de la sinérgica⁶⁶— resulta, sin embargo, instructivo hacer una distinción entre dos aspectos esencialmente diferentes. Un aspecto generalmente esperado que describe una explosión abrupta del caos tras condiciones de orden iniciales. El caso más o menos inesperado remite a la observación de que el caos puede también conducir al orden. Sorprendentemente, este tipo de fenómenos parece ser la regla en biología, en la que la formación de patrones temporales y espa-

ciales puede darse en sistemas dinámicos que distan del equilibrio.

Las implicaciones biológicas de la teoría del caos y de la biosemiótica en su calidad de doctrina de signos y señales están estrechamente interconectadas. La naturaleza está repleta de sistemas dinámicos que distan del equilibrio, compuestos de individuos interdependientes e interactivos. El órgano de control central de un sistema como éste es siempre un conjunto de señales que pertenecen a los elementos no caóticos y de sutil interacción al nivel jerárquico inmediatamente inferior, y que deberían distinguirse claramente del ruido ambiental. Estas señales y sutiles interacciones, que obedecen con frecuencia a leyes no lineales, están concebidas para desembocar en la conducta y el desarrollo temporal del sistema que, como es sabido, suele ser irregular, individual e impredecible. Todos los paradigmas conservadores nos inducen engañosamente a pensar en términos de modelos de equilibrio. Los verdaderos fenómenos, sin embargo, no tienen en esencia restricciones y por ello son menos predecibles. Los sistemas que distan del equilibrio, las estructuras disipativas y las espirales de retroalimentación no lineales están estrechamente vinculadas a una trans-

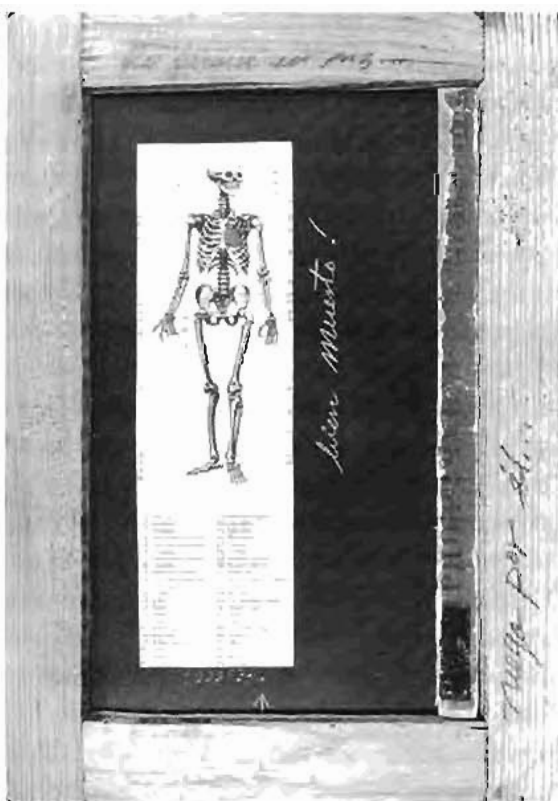
ferencia constante de señales, con lo que generan la actividad frenética de la vida —complejidad, estructuras de red y diversidad, al igual que crecimiento, réplica y lenguaje, para nombrar tan sólo algunos de los eventos semióticos más habituales. La proximidad del mundo semiótico con el caos determinístico sigue siendo extraña para la mayoría de los científicos. Al estar habituados a trabajar con sistemas aislados, reduccionistas, lineales y monocausales, a nuestra intuición le cuesta familiarizarse espontáneamente con la nueva perspectiva y sus consecuencias. Por esta razón, la biosemiótica es una perspectiva prometedora y fecunda.

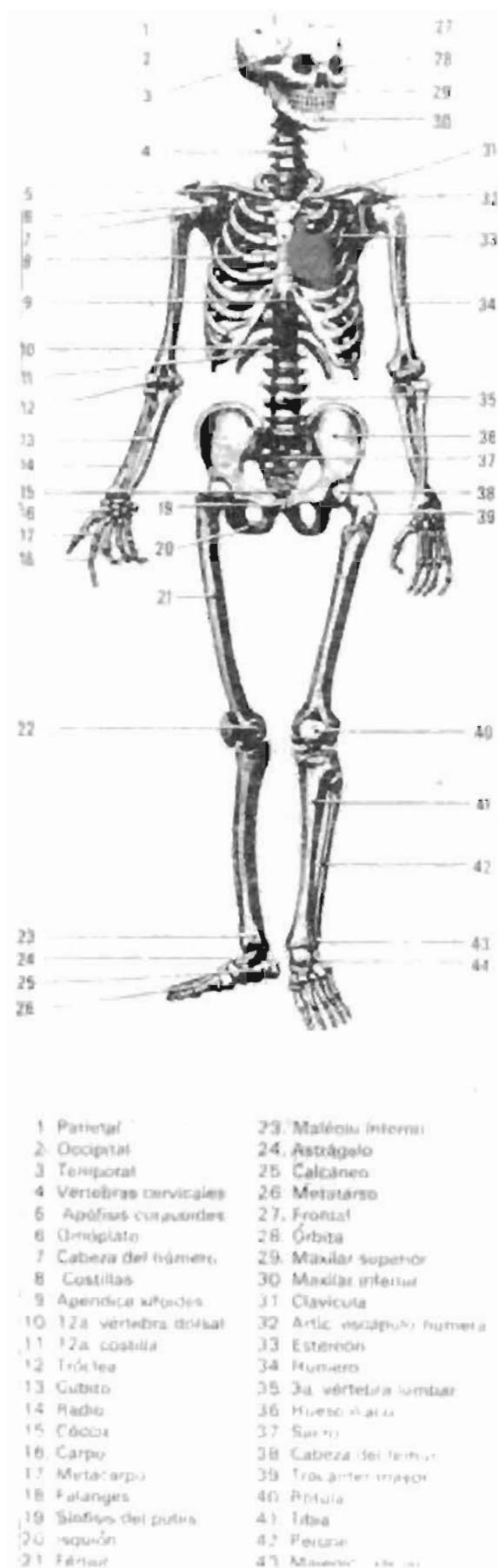
Sinopsis y perspectiva

La teoría es siempre lo primero en todo lo relacionado con el progreso científico.⁶⁸⁻⁷⁰ En cuanto a la biología actual esto significa que se está llevando a cabo una reorientación intelectual. Las expresiones “biología sistémica”, como la describe Bleeken,¹³ e “información biológica”, según la definición de Albrecht-Buehler,¹⁴ apuntan hacia el problema esencial de las ciencias biológicas.

No se sabrá hasta qué punto la comunicación y la interacción están determinando los sistemas vivos, tanto en su interdependencia como internamente, partiendo del punto de vista exclusivamente molecular. Debe elaborarse un marco filosófico lo suficientemente general para que represente y abarque aquellos aspectos del sistema de vida que rebasan el alcance de la biología molecular. La biosemiótica, como se describe en este artículo, está calificada para esta labor y nos indica la dirección en que debemos seguir. El mensaje de la biosemiótica se centra en la comunicación mediada por signos como una característica primordial de la vida, y el ir de la cibernética a las estructuras disipativas nos da acceso a los aspectos más *diversos e irregulares* de los sistemas vivos. Y es precisamente esta frontera de lo no lineal en la naturaleza la que el nuevo paradigma deberá reconocer como un requisito fundamental para que la biología surja como una disciplina autónoma.

Una doctrina de signos y señales comparativa y universal podría convertirse en el lenguaje del





lenguaje usado en los sistemas vivos, e iniciar un cambio de paradigma ahora, y de una forma ampliamente factible. Al adoptar este enfoque se obtienen beneficios evidentes. La biosemiótica representa una filosofía nueva. Dentro de un marco omnimodo, terminará por abarcar la gama completa, desde la biología molecular hasta el caos determinístico. El salto que nos permita llegar a esta noción fundamental no parece que se haya logrado hasta el momento. Primero deberá ser un salto intelectual. Plantear la objeción de que aún no existe una teoría biosemiótica consistente sería erróneo y por lo tanto debería evitarse. Un proyecto digno de una investigación a gran escala debe tener visión a futuro y sobre todo ser nuevo. Aunque, al ser realmente nuevo, impide que se presente como una solución inmediata.

Entonces, ¿qué habilidades debe desplegar el científico al embarcarse en una empresa como ésta, y hasta qué punto debe llegar a convertirse en un perfecto semiólogo? Dado que nadie puede prepararse adecuadamente en todas estas áreas, la ciencia de los signos debe desarrollarse de una manera poco ortodoxa. No como una disciplina académica nueva representada por una cátedra universitaria de biosemiótica sino, más bien, como un nuevo tipo de cooperación, es decir, en una institución apropiada. La biosemiótica, como paradigma, cambiará el punto de partida y la meta de los experimentos e hipótesis: *desde cómo la información genética* codificada en el ADN determina, en un proceso lineal y predecible, la estructura y la función de sistemas aislados en un organismo vivo, *hasta cómo la red semiótica de señales e información*, dentro de los organismos y entre ellos, revela un enfoque ante los fenómenos no lineales, impredecibles y caóticos en biología. Creemos que estos últimos representan, de manera bastante sobresaliente, nada menos que “la otra cara de la moneda”; y junto con la biología molecular, deben guiarnos hacia las verdaderas características de la vida. Familiarizarnos con ellos es gratificante y conlleva esta prodigiosa percepción: cuanto más entendamos las complejidades de un sistema menos debemos confiar en nuestro poder para manipularlo y manejarlo. Comprender esto representa una meta para la biología que justifica cualquier esfuerzo.

Notas:

- ¹ Holliday, R., "Successes and Limitations of Molecular Biology", *Journal Theory Biology*, Vol. 132, 1988, p. 253.
- ² Lehninger, A. L., "Principles of Biochemistry", Worth, New York, 1982.
- ³ Thorpe, W. H., "Reductionism in Biology", *Studies in the Philosophy of Biology* (F.J. Ayala, T. Dobzhansky, eds.), MacMillan, London, 1974.
- ⁴ Beckner, M., "Reduction, Hierarchies and Organicism", *Ibid.*, p. 163.
- ⁵ Popper, K.R., "Scientific Reduction and the Essential Incompleteness of All Science", *Ibid.*, p. 259.
- ⁶ Maddox, J., "Finding wood among the trees", *Nature*, Vol. 333, 1988, p. 11.
- ⁷ Rubin, H., "Molecular biology running into a cul-de-sac?", *Ibid.*, Vol. 335, 1988, p. 121.
- ⁸ Rose, S., "Reflections on reductionism", *Trends Biochemical Science*, Vol. 13, 1988, p. 160.
- ⁹ Morris, C., *Sings: Language and Behavior*, New York, Prentice Hall, 1946.
- ¹⁰ Eco, U., *Einführung in die Semiotik*, Fink, 1988.
- ¹¹ Eco, U., *A Theory of Semiotic*, Bloomington, Indiana University Press, 1976.
- ¹² Peirce, C.S., *Collected papers*, Vol. 5, Harvard University Press, Cambridge, 1934, p. 302.
- ¹³ Bleekken, S., "Welches sind die existentiellen Grundlagen lebender Systeme?", *Naturwissenschaften*, Vol. 77, 1990, p. 277.
- ¹⁴ Albrecht-Buehler, G., "In Defence of 'Nonmolecular' Cell Biology", *International Review Cytol.*, Vol. 120, 1990, p. 191.
- ¹⁵ Uexküll, T. V., "Possible contribution of biosemiotics to the problem of communications among lymphocytes", *The Semiotics of Cellular Communication in the Immune System*, (E. E. Sercarz, F. Celada, N.A. Mitchison, T. Tada, eds.), Berlin, Springer, 1988, p. 25.
- ¹⁶ Anderson, M., Deely, J., Krampen, M., Randsdell, J., Sebeok, T.A., Uexküll, T.V., "A semiotic perspective on the sciences: steps toward a new paradigm", *Semiotica*, Vol. 52, 1984, p. 7.
- ¹⁷ Wiener, N., "Kybernetik", Düsseldorf, Econ, 1963.
- ¹⁸ Baer, E., "The Medical Symptom" *Frontiers in Semiotics*, (J. Deely, B. Williams, F.E. Kruse, eds.) Bloomington, Indiana, 1986, p. 140.
- ¹⁹ Krampen, M., "Phytosemiotics", *Ibid.*, p. 83.
- ²⁰ Deely, J., "On the Notion of Phytosemiotics", *Ibid.*, p. 96.
- ²¹ Sebeok, T.A., "The Sign and its Masters", London, Austin, 1978.
- ²² Sercarz, E. E., Celada, F. Mitchison, N.A. Tada, T. (eds.), *The Semiotics of Cellular Communication in the Immune System*, Berlin, Springer, 1988.
- ²³ Sebeok, T.A. (ed.), *Encyclopedic Dictionary of Semiotics*, Berlin-New York, Mouton-de Gruyter, 1986.
- ²⁴ Eco, U., "On Semiotics and Immunology", *The Semiotics of Cellular Communication in the Immune System*, (E.E. Sercarz, F. Celada, N.A. Mitchison, T. Tada, eds.), Berlin, Springer, 1988.
- ²⁵ Jerne, N.K., "The generative grammar of the immune system", *Bioscience Rep.* Vol. 5, 1985, p. 439.
- ²⁶ Chomsky, N., "Current Issues in Linguistic Theory", *The Hague*, Mouton, 1964.
- ²⁷ Coutinho, A., Forni, L., Holmberg, D., Ivars, F., Vaz, N., "From an Antigen-Centered, Clonal Perspective of Immune Responses to an Organism-Centered Network Perspective of Autonomous Activity in a Self-Referential Immune System", *Immunology Review*, Vol. 79, 1984, p. 151.
- ²⁸ Scott, J.P., "Observation", *Animal Communication* (T.A. Sebeok, ed.), Bloomington, Indiana University Press, 1968.
- ²⁹ Prodi, G., "Signs and codes in immunology", *The Semiotics of Cellular Communication in the Immune System*, (E.E. Sercarz, F. Celada, N.A. Mitchison, T. Tada, eds.), Berlin, Springer, 1988.
- ³⁰ Sebeok, T.A., "Perspectives in Zoosemiotics", *The Hague*, Mouton, 1972.
- ³¹ Florkin, M., "Concepts of molecular biosemiotics and of molecular evolution", *Comprehensive Biochemistry*, Vol. 29A, (M. Florkin, E.H. Stoltz, eds.), Amsterdam, Elsevier, 1974, p. 1.
- ³² Sebeok, T.A. (ed.), *Animal Communication*, Bloomington, Indiana University Press, 1968.
- ³³ Sebeok, T.A., "The Notion of Zoosemiotics", *Frontiers in Semiotics*, (J. Deely, B. Williams, F.E. Kruse, eds.) Bloomington, Indiana University Press, 1986, p. 74.
- ³⁴ T.A., "Talking with Animals": Zoosemiotics Explained, *Ibid.*, p. 76.
- ³⁵ Law, J.H., Regnier, F.E., "Pheromones", *Annual Review Biochem.*, Vol. 40, 1971, p. 533.
- ³⁶ Nordlund, D.A., Jones, R.L., Lewis, W.J. (eds.), *Semiochemicals*, New York, Wiley, 1981.
- ³⁷ Lugtenberg, B.J.J. (ed.), *Signal Molecules in Plants and Plant-Microbe Interactions*, Berlin, Springer, 1989.
- ³⁸ Tembrock, G., "Biokommunikation: Informationsfl-

bertragung im biologischen Bereich". Berlin, Akademie Verlag, 1971.

³⁹ Russert-Kraemer, L., "Prologue: The Necessity of the Organism", *American Zoology*, Vol. 29, 1989, p. 1057.

⁴⁰ Wake, D.B., Roth, G. (eds.) "Complex Organismal Functions: Integration and Evolution in Vertebrates", Report of the Dahlem Workshop, Berlin 1988, New York: Wiley, 1989.

⁴¹ "Is the Organism Necessary?", Symposium presented at the Annual Meeting of the American Society of Zoologists, New Orleans. 1978, *American Zoology*, Vol. 29, 1989, p. 1057.

⁴² Ehrenfeld, D., "Why put a Value on Biodiversity?", *Biodiversity* (E.O. Wilson, ed.) Washington: National Academy Press, 1988, p. 213.

⁴³ Ehrenfeld, D., "Thirty million cheers for diversity", *New Scientist*, 12 June 1986, p. 38.

⁴⁴ Wilson, E.O., "The coming pluralization of biology and the stewardship of systematics", *BioScience*, Vol. 39, 1989, p. 242.

⁴⁵ Wilson, E.O. (ed.), *Biodiversity*, Washington, National Academy Press, 1988.

⁴⁶ Wilson, E.O., "Time to Revive Systematics", *Science*, Vol. 230, 1985, p. 1227.

⁴⁷ Eder, J., Rembold, H. (eds.), *Chemistry and Biology of Social Insects*, München: Peperny, 1987.

⁴⁸ Blum, M.S., Fales, H.M., "Eclectic chemisociality of the honeybee: a wealth of behaviors, pheromones, and exocrine glands", *Journal of Chemical Ecology*, Vol. 14, 1988, p. 2099.

⁴⁹ Wilson, E.O., Hölldobler, B., "Dense heterarchies and mass communications as the basis of organization in ant colonies", *Trends Ecology Evolution*, Vol. 3, 1988, p. 65.

⁵⁰ Wenner, A.M., "Honey bees", *Animal Communication* (T.A. Sebeok, ed.), Bloomington, Indiana University Press, 1968, p. 217.

⁵¹ Rembold, H., "Caste Differentiation of the Honey Bee", *Chemistry and Biology of Social Insects* (J. Eder, H. Rembold, eds.), München, Peperny, 1987, p. 3.



⁵² Rembold, H., Weigner, Ch., "Chemical composition of chickpea, *Cicer arietinum*, exudate", *Z. Naturforsch.*, Vol. 45c, 1990, p. 922.

⁵³ Rembold, H., "Behavioural chemicals in insect-plant interactions", *Dynamics of Insect-Plant Interactions* (T.N., Ananthakrishnan, A. Raman, eds.), Oxford & IBH Publication Company, New Delhi, 1988, p. 71.

⁵⁴ Rembold, H., "Azadirachtins, their structure and mode of action", *Insecticides of plant origin*, (J.T. Arnason, B.J.R. Philogene, P. Morand, eds.) *ACS Symp. Ser.* Vol. 387, 150, 1989, p. 150.

⁵⁵ Rembold, H., García, E.S., "Azadirachtin inhibits *Trypanosoma cruzi* infection of its triatomine host. *Rhodnius prolixus*", *Naturwissenschaften*, Vol. 76, 1989, p. 77.

⁵⁶ Goldbeter, A. (ed.) *Cell to Cell Signalling*, Academic Press, London, 1989.

⁵⁷ Crutchfield, J.P., Farmer, J.D., Packard, N.H., Shaw, R.S., "Chaos", *Scientific American*, Vol. 225, 1986, p. 38.

⁵⁸ Mandelbrot, B.B., *The fractal geometry of nature*, Freeman, New York, 1983.

⁵⁹ Percival, J., "Chaos: a science for the real world", *New Scientist*, 21 October 1989, p. 42.

⁶⁰ May, R., *The chaotic rhythms of life*, *New Scientist*, 18 November 1989, p. 37.

⁶¹ Freeman, W.J., "The physiology of perception", *Scientific American*, Vol. 264 (2), 1991, p. 34.

⁶² West, B.J., Goldberger, A.L., "Physiology in Fractal Dimensions" *American Scientific*, Vol. 75, 1987.

⁶³ May, R.M., "When two and two do not make four: nonlinear phenomena in ecology", *Proc. Real Society Lond. B.*, Vol. 228, 1986, p. 241.

⁶⁴ Hess, B., "Oscillating reactions", *Trends Biochemical Science*, Vol. 2, 1977, p. 193.

⁶⁵ Hess, B., Markus, M., "Order and chaos in biochemistry", *Ibid.* Vol. 12, 1987, p. 45.

⁶⁶ Haken, H., "Synergetik. Selbstorganisationsvorgänge in der Physik, Chemie und Biologie", *Naturwissenschaften Rdsch.* Vol. 38, 1985, p. 171.

⁶⁷ Prigogine, I., "Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität", *Naturwissenschaften*, München, Piper 1979. Prigogine, I., Stengers, J., "Order out of chaos: man's new dialogue with nature", New York, Bantam, 1984.

⁶⁸ Mayr, E., *Toward a new philosophy of biology*, Harvard University Press, Cambridge, 1988.

⁶⁹ Mayr, E., *Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt*, Berlin, Springer, 1984.

⁷⁰ Sattler, R., *Biophilosophy. Analytic and Holistic Perspectives*, Berlin, Springer, 1986.