
LA BIOSEMIÓTICA Y LA BIOLOGÍA COGNITIVA EN ORGANISMOS SIN SISTEMA NERVIOSO

ÓSCAR CASTRO GARCÍA

ABSTRACT. Biosemiotics is a discipline that emerged in the 1960s from studying communication and transfer of signs and signals between animals (zoosemiotic) by the semiologist Thomas Sebeok. Its origin can be placed a hundred years ago in the works of the biologist and philosopher Jakob von Uexküll, who developed a “theory of meaning” (*Bedeutungslehre*) to describe (with the minimal possible anthropocentricity) how animals perceive their environment and inner world. It is reviewed here the conditions of possibility for cognitive processes in organisms without a nervous system, where some events lead us to propose ways of learning and behavior influenced not only by basic tropisms. We study the biosemiotic cognitive foundations within slime molds and bacteria, in order to establish a possible phenomenological biology, based on the measurement of minimal perception thresholds.

KEY WORDS. Biosemiotics, transdisciplinarity, cognition, information, *Physarum polycephalum*, tensegrity, microtubules, haptic perception, tectology, Santiago theory, Weber-Fechner law.

1. LA BIOSEMIÓTICA COMO CIENCIA TRANSDISCIPLINAR

Después de los estudios efectuados en los múltiples campos de la biología evolutiva y del desarrollo, en torno a la comprensión de los organismos como sistemas abiertos a equilibrios complejos (Prigogine 1955/1961, 1977), se ha conciliado la concepción de autorganización en los sistemas vivos (Eigen 1971) con la producción de sus componentes, y con la autorreferencia de los mismos, en función de la percepción del medio inmediato y de su sistema estructural, comprendidos como sistemas autopoieticos (Maturana y Valera 1974, 1994). Esta conciliación ha ayudado no tan solo a establecer una idea de complejidad jerárquica de la organización (Pattee 1973; Salthe 1985, 2008) como agente autónomo en orden biológico al límite del caos (Kauffman 1990, 1991; Barandiaran, Di Paolo y Rohde 2009¹), sino que también ha puesto en consideración la apertura hacia una compren-

Departamento de Filosofía de la Universidad Autónoma de Barcelona, y OAS-BioAstronomy Group, Observatorio Astronómico de Segurilla (OAS), Toledo, España. / oscarcastrogarcia@yahoo.es

sión de la fenomenología de los organismos vivientes desde su propia pulsión (Varela 1992), fundamentadas en las ideas de Uexküll (Maturana 1996; Weber y Varela, 2002²).

A la vez que la biología ha ido profundizando de forma independiente entre los niveles estructurales (molecular, celular, bioquímica, biofísica, genética, proteínómica, de desarrollo), los acercamientos fisiológico-anatómicos, y la diversidad y evolución de los organismos, ha ido también necesitando de un replanteamiento interdisciplinario cada vez más complejo en el estudio de los organismos en interacción (ecología, etología y comportamiento). A medida que el estudio de la complejidad del conocimiento se ha ido ampliando, también lo ha hecho el modo de conocer. Por ello se han establecido diferentes arquitecturas explicativas (biología de sistemas, biología modular) que van respondiendo a las cuestiones de interacción entorno-interior y las propiedades emergentes con enfoques holísticos (Kitano 2001), pero que, a su vez, necesitan de nuevas conexiones interdisciplinarias (bioinformática o ciencias cognitivas, entre otras) de cara a responder a los descubrimientos que van surgiendo en la comunidad científica. Una de las necesidades con las que se ha topado el desarrollo teórico de la biología ha sido el poder ofrecer una interpretación coherente y consistente al múltiple desarrollo de lo vivo en todos los campos de investigación. El problema de dicha interpretación no ha sido resuelto aún, habiéndose consolidado la teoría de la evolución de Darwin en las perspectivas de la síntesis moderna o en la evo-devo. Dice Howard Pattee:

El problema fundamental de la teoría de los sistemas biológicos es el de entender y representar las interacciones dentro de tales sistemas epistemológicos, es decir, sistemas que tengan dinámica de valor dependiente y una autodesignación con valor independiente que limita esta dinámica de manera que formen un organismo coherente³.

A partir de los años setenta, investigadores de diversos campos establecieron las posibles relaciones entre las transducciones de señales moleculares y su semiótica o estudio de la comunicación entre éstas y su respuesta biológica (Florkin 1974; Krampen 1981). Fue sin embargo en la década de los noventa cuando el concepto de biosemiótica tomó cuerpo de investigación, después de los esfuerzos sostenidos del semiólogo Thomas Sebeok y del médico Thure von Uexküll, durante más de treinta años, para consolidar una ciencia que conecte la comunicación y el conjunto de signos y señales que se establecen a diferentes niveles de organización biológica (desde el molecular a los supraorganismos).

Dicha consolidación no sólo está en conexión entre semiólogos (Sebeok, Peirce, Kull, Lotman) y biólogos (Uexküll, Hoffmeyer, Emmeche, Patee, Weber, Rütting, Sharov, Kull, Markoš, Barbieri, y Witzany entre otros);

también existe conexión entre filósofos de la ciencia (Emmeche, Peirce, Chebanov, Stjernfelt, Marko, Brier, Barandiaran, Moreno y Etxeberria entre otros), matemáticos (Thom, Farina, Scozzafava, Morri), físicos (Tarbosky, Christensen, Patee, Nicolescu), entre lingüistas (Favareau), cibernéticos (Brier, Löckenhoff, Emmeche) y otros colegas de diversas disciplinas.

La interrelación entre las múltiples disciplinas científicas que se interesan en el desarrollo epistemológico de la biosemiótica comprende que para que la conectividad entre dichas disciplinas provoque una emergencia de significado sólido y coherente respecto a una mejora de la comunicación científica de la comunicación biológica ⁴, es urgente trascender la interdisciplinariedad, pues no tiene sentido mantenerse en el nivel de intercambio de materias disciplinarias únicamente en cuanto a relacionar patrones de modelos científicos usufructuables (en sus límites tanto semióticos como disciplinarios). Es necesario establecer una plasticidad cognoscitiva (Nicolescu 2008) para obtener niveles holísticos de desarrollo científico que permita una hermenéutica biológica significativa.

La capacidad transdisciplinar permite una mayor transacción y coordinación de criterios científicos de diferentes naturalezas epistemológicas, adaptando un contraste profundo de acuerdo con una contemplación de lo complejo como un todo. Aquí la biosemiótica establece la condición de posibilidad para comprender la fenomenología biológica como un todo significativo en cada una de sus jerarquías interpretativas de los sistemas vivos, llamado también “biohermenéutica” (Chebanov 1999).

2. UMWELT Y EL ENCAJE TELEONÓMICO

En 1934, el biólogo Jakob von Uexküll ofreció una síntesis excelente en el campo de la biología teórica desarrollando el estudio de la percepción del mundo envolvente de los organismos vivos (*Umwelt*). Cada organismo vivo tiene una determinada percepción del mundo que le circunda, que se conforma de acuerdo a la estructura de recepción (*Merkorgan*) y a la de percepción en su interacción (*Wirkorgan*). Si un humano, un perro y una mosca conviven en una misma habitación, para cada uno hay una descripción parcial del entorno en el que cohabitan, que tiene para cada uno de ellos una riqueza de portadores de significación, según la complejidad de interrelaciones perceptivas de cada organismo. Esta afirmación no es fruto de especulaciones filosóficas, sino de un estudio que Uexküll realizó desde 1909 (Uexküll 1909) y que en 1920 los describió en su obra *Theoretische Biologie* (Uexküll 1920/1928/1973). Uexküll descubrió que existen mecanismos de retroalimentación en invertebrados marinos, a través de lo que llamó “circuitos funcionales” (*Funktionskreis* ⁵), que se conectan entre sí de diversas maneras, formando un “mundo funcional” (*Fuktionwelt*) de los

organismos vivos (incluidos en organismos sin sistema nervioso, aunque sus fundamentos fuesen neuromusculares).

Uexküll aborda la construcción de la realidad a partir del patrón biológico de la percepción de cada organismo en su medio natural —también llamado “conformidad a plan”—, esto es, las relaciones entre la subjetividad perceptiva y el entorno. El ciclo funcional entre el entorno y las estructuras de percepción del organismo crea las condiciones de la construcción de la realidad, del mundo subjetivo de los distintos organismos. De este modo, Uexküll analiza la vida de los seres vivos y su interacción en la formación de agregaciones grupales organizadas. La confirmación de la realidad envolvente es una expresión subjetiva que cada organismo construye a partir de su facultad perceptiva, construcción posible gracias a los signos. La ausencia de signos es el silencio, la pérdida del sentido y del orden. No se puede ver como realidad algo sobre lo que no existen conceptos/signos previos. La habilidad de los seres vivos en la interpretación de su entorno determina la amplitud de sus mecanismos de supervivencia, su capacidad de adaptación y de evolución.

Esta línea de investigación sobre la percepción del medio circundante y el mundo interno de los organismos tiene sus fundamentos en dos líneas de estudio desarrolladas por dos de los maestros del pensamiento biológico de Uexküll: Karl Ernst von Baer y Johannes Müller.

De von Baer, desarrolla uno de los conceptos más importantes para el estudio de la fisiología de la percepción: la percepción del tiempo o “longitudes de momento” de los organismos vivos ⁶. Algunos de ellos fueron estudiados por Uexküll a través de la cronofotografía desarrollada por Etienne Jules Marey ⁷. Uexküll demostró que el tiempo no es un fluido continuo, sino que está “cuantificado” perceptualmente, a través de lo que en la actualidad llamamos “*frame*” o número de imágenes por segundo (Nikolaev, et al. 2010; Freeman 2007).

De Johannes Müller (1801-1858), Uexküll desarrolla la ley de Müller ⁸ que contempla que un tipo de sensación que sigue a la estimulación no depende del modo de estimulación sino de la naturaleza del órgano sensitivo. Con esto, Müller defendería la que sería denominada “ley de energía específica de los nervios” y que actualmente está en debate ⁹ (Norsell, Finger y Lajonchere 1999).

Aparte de elaborar investigaciones fisiológicas fundamentales para el estudio de la percepción de los invertebrados marinos, Uexküll desarrolló a través de Müller y de von Baer el primer estudio científico de lo que llamaría una “biología subjetiva ¹⁰”. El concepto de subjetividad en biología, Uexküll lo trasladó tanto en la anatomía como en la fisiología. Incluso estuvo muy implicado en el problema del protoplasma como principio biológico que permite la diferenciación perceptiva entre el entorno decodificable (*Umwelt*) y el interior del organismo unicelular (*Innenwelt*) (Uex-

küll 1909). La actualización conceptual de la insistencia de Uexküll con referencia a la subjetividad de la biología es epistemológicamente tautológica a una fenomenología de la biología que concordaría con los pensamientos de Edmund Husserl y de Aron Gurwitsch¹¹, que reconocería Merleau-Ponty y Kurt Goldstein, y que llevaría a cabo Francisco Varela y Humberto Maturana.

Uexküll recogerá también de von Baer y de Müller dos aspectos gnoseológicos de la biología que vinculan el aspecto subjetivista-fenomenológico de los estudios experimentales. Por parte de Müller está la fundamentación kantiana de las formas apriorísticas de la percepción y que se mantiene vigente (Langston, et al. 2010; Palmer y Lynch 2010; Willis, et al. 2010). En el caso de la influencia de von Baer, Uexküll recoge la idea kantiana de la *planificación según lo previsto* o "*Zielstrebigkeit*"¹², comprendiendo el sentido del tiempo como procesos de la vida, formando parte de la construcción de los organismos. Uexküll toma dicha *planificación según lo previsto* de von Baer y la enlaza con la concepción teleológica kantiana de la *conformidad a un fin* "*Zweckmäßigkeit*" de la *Crítica del juicio* (Kant 1786-1790), para conjugar una conciliación de propósitos tanto temporales como morfológicos —o de distribución espacial— como una *conformidad a plan* o "*Planmäßigkeit*" (Uexküll 1920/1928 /1973). De esta forma quiso abrir un campo de estudio científico de la anatomía y la fisiología subjetiva que permitiera estudiar el *porqué los seres vivos perciben el entorno de acuerdo con la estructura de su órgano perceptivo y de su sensibilidad* (bio-físico-químico). Ante este estudio, Uexküll no sólo renunció epistemológicamente a un reduccionismo, sino que entrevió lo que treinta años más tarde se denominaría la "teoría de sistemas abiertos". Esa teoría la fundó Ludwig von Bertalanfy y que, a su vez, refundó lo que sería el organicismo y la autorganización de los sistemas vivos como sistemas abiertos¹³.

Dicho organicismo que Uexküll desarrolló tuvo su centro de gravedad en el estudio de la subjetividad fenomenológica. Cabe pensar que su atención se centró en la cuestión viva de la organización biológica más que su componente reductible fiscalista. Dicho pensamiento, acompañado por la fundamentación teleológica interna de los seres vivos, apoyó el desarrollo de una visión que Timothy Lenoir denomina "teleo-mecanicista" o "vitalismo-materialista" (Lenoir 1980; Lenoir 1988; Lenoir 1992). Uexküll compartió gnoseológicamente la idea del vitalismo de Hans Driesch, pero que no la aceptó epistemológicamente como metodología científica¹⁴, pues se decantó por ser un precursor de un desarrollo constructivista de la biología fenomenológica como una orientación paralela a la conformidad a plan, que constituye uno de los ejes de su biología teórica. Esta conformidad a plan describe una determinada disposición de las diferentes partes de un organismo que hacen de él una unidad. Este plan, o *Bauplan*, es determinante pues, a través de su conformidad, se eslabonan

las diferentes funciones para procurar la unidad de su función de conjunto. Con ello, Uexküll aportaría una de las ideas más revolucionarias de su pensamiento biológico: la adecuación o encaje progresivo a los equilibrios inestables entre el medio circundante y el mundo interno del organismo, en el que la “coordinación” de las relaciones de cada círculo o circuito funcional con su mundo perceptible es el factor de desarrollo y de morfogénesis. Esta adecuación que denomino “*encaje teleonómico*” permite la relación entre objetivo y motivo en la epigénesis y, por lo tanto, ofrece una posibilidad significativa a la *conformidad a plan* “*Planmäßigkeit*”, que permite el despliegue genético (desde el sentido mendeliano de la herencia --tal como Uexküll aceptó el concepto de gen) y que sin un determinismo absolutista permite la “coordinación biológica” en tanto que establece la armonía entre el *Umwelt* y el mundo interno o *Innenwelt* del organismo ¹⁵.

3. AUTOPOIESIS Y COGNICIÓN

Uno de los problemas fundamentales que la biología teórica ha querido contrastar con la biología experimental ha sido la propia definición de la vida como proceso, es decir, ¿cómo es posible comprender los procesos biológicos desde la experiencia del propio organismo biológico que los vive? Esta pregunta ha ofrecido un camino de estudio fenomenológico y constructivista para la biología, que con Uexküll estuvo en permanente desarrollo en su *Umweltforschung* hasta su desaparición en 1944, y que a partir del estudio de los organismos vivos como sistemas abiertos (von Bertalanffy 1968) ha ido desarrollando la especificidad de lo que Francisco Varela y Humberto Maturana definieron como *autopoiesis*. Esta es la propiedad básica de los seres vivos, en tanto que son sistemas determinados en su estructura, es decir, son sistemas tales que cuando algo externo incide sobre ellos, los efectos dependen de ellos mismos, de su estructura en ese instante, y no de lo externo (Varela y Maturana 1973, 1994; Varela, Maturana y Uribe 1974). *Auto* significa “sí mismo” y se refiere a la autonomía de los sistemas autorganizadores. *Poiesis* es la raíz griega de la palabra “poesía” que significa “creación”. Así, autopoiesis significa “creación de sí mismo” (Capra 1996). Dicha autopoiesis tiene su descripción química (Luisi y Varela 1989) en orgánulos y micelas (una fase coloidal de conglomerados moleculares tensioactivos, como el ácido oleico) en las que, cuando aparece una equivalencia cuantitativa de reacciones de generación y de destrucción (en sus velocidades) se produce un equilibrio homeostático. Dicho equilibrio homeostático dinámico no modifica la unidad y permite describir de esta forma una autopoiesis. Pero esto no significa que la micela, o una vesícula pueda ser un organismo vivo. Aparentemente, la actividad de una vesícula de oleato no es tan diferente a una ameba que

absorbe nutriente y excreta un subproducto. Entonces, ¿dónde reside la diferencia? ¿Todos los sistemas autopoieticos están vivos?

Los sistemas vivos son sistemas cognitivos y el proceso de vivir es un proceso de cognición. Esta afirmación es válida para todos los organismos, tengan o no sistema nervioso (Maturana 1970; Maturana y Varela 1980; Capra 1996).

La afirmación de Maturana establece la condición de coemergencia entre la autopoiesis y la percepción del medio circundante, como un proceso cognitivo que se identifica con los procesos autopoieticos en los organismos biológicos, tanto en los seres unicelulares como pluricelulares.

A esta afirmación, conocida como “teoría de Santiago” (Capra 1996) se le debe añadir un segundo punto referente a los procesos cognitivos:

Si un sistema vivo entra en una interacción cognitiva, su estado interno se cambia de una manera relevante para su mantenimiento, y éste entra en una nueva interacción, sin pérdida de su identidad. En un organismo sin un sistema nervioso (o su equivalente funcional) sus interacciones son de naturaleza química o física (una molécula es absorbida y se inició un proceso enzimático, o un fotón es capturado y se lleva a cabo un paso en la fotosíntesis). Para tal organismo las relaciones sostenidas entre los eventos físicos quedan fuera de su dominio de interacciones ¹⁶.

Por ello, podemos afirmar que existen procesos cognitivos sin sistema nervioso y que, aunque las interacciones sean de naturaleza físico-química y su proceso cognitivo está fuera de dicho dominio, más bien sostiene una relación significativa para el proceso autopoietico ¹⁷.

Así pues, para que hablemos de seres vivos, necesitamos entonces identificar los procesos autopoieticos determinados que permitan la autorganización, el automantenimiento, la autonomía, la autorreplicación, el metabolismo y una evolución abierta-cerrada ¹⁸ con procesos cognitivos que permitan la acción e interacción con el entorno (*Umwelt*), de acuerdo con la identificación de los signos de percepción traducidos en señales decodificables por el propio organismo. Es por eso que podemos hablar de la autopoiesis y la cognición como procesos biosemióticos. Tal como lo dice Andreas Weber:

La escuela de Varela subraya que el mundo exterior actúa como una mera ‘patada’ que motiva al sistema a establecer un nuevo equilibrio caracterizado sólo por las necesidades de automantenimiento. Para un enfoque biosemiótico esto significa dejar de preocuparse por las constricciones del problema mente-cuerpo. La circularidad material de la autopoiesis deja obsoleto el dualismo. En un sistema autorreferencial, el significado es el ‘lado interior’ del aspecto material de la clausura del sistema (Weber 2001).

Hablar de la liberación del dualismo mente-cuerpo para organismos vivos sin sistema nervioso parece que está fuera de su contexto. Pero tal como la enuncia la teoría de Santiago, las relaciones sostenidas entre los eventos físicos quedan fuera del dominio de interacciones del organismo por “puras relaciones” (Maturana 1970).

Para Varela, los seres cognitivos no representan un mundo pre-dado, y la cognición consiste más bien en “enacción”¹⁹ (Varela 1997), entendiendo por ésta la puesta en marcha de un “mundo” que surge a partir de un cúmulo autoinductivo de la variedad de acciones que un ser vivo realiza en el “mundo”. La enacción es posible gracias a la “clausura operacional”²⁰ del sistema, es decir, de sus propiedades autorganizativas y la forma en que el sistema se acopla con el medio. Los sistemas enactúan un mundo sobre la base de su autonomía o, dicho de otra forma, el mundo se enactúa a través de una historia de acoplamiento estructural. La clausura y el acoplamiento hacen emerger un mundo que resulta relevante —y por lo tanto significativo— para un sistema biológico cualquiera, incluso si son plantas, bacterias, hongos mucilaginosos, o cualquier protista.

La organización es entonces una invariante de la dinámica de todos los sistemas biológicos, es decir, “es el complejo unitario de relaciones que constituye la unidad de lo viviente” (Luisi 2006); y acogemos su redefinición de autopoiesis:

un sistema de organización (definido como unidad) en red de procesos de transformación y de destrucción de componentes, en los que a través de sus interacciones y transformaciones se regeneran permanentemente y se forjan redes de procesos, constituyendo de ese modo una unidad topológica concreta definida por una frontera y relacionado a través de un acoplamiento adaptativo o cognitivo (Luisi 2010).

Por lo tanto, el significado de *Umwelt* como enacción sería la representación o *performance* del organismo, y a su vez la “emergencia” de un mundo significativo e interdependiente, a partir de un trasfondo de comunicación en “clausura operacional”. También es autopoietico, puesto que presenta una red de “círculos funcionales” cognitivos y de retroalimentación en “conformidad a un plan” genético que permite mantener estos círculos invariables, tanto ontogénica como filogenéticamente²¹. Con ello el concepto de *Umwelt* de Uexküll enriquece su significado, al ser un fundamento cognitivo de un organismo y que defino como “enacción autopoietica”, la “acción guiada perceptivamente”. Es decir, es la dinamización (*Wirkmale*) de la actividad de un organismo guiada por las sensaciones (*Merkmale*) en una emergencia de un mundo subjetivo configurado por el agente autopoieticamente, en “conformidad al plan” genotípico y fenotípico.

4. LA BIOLOGÍA COGNITIVA Y LOS SISTEMAS INTELIGENTES

La cognición es, ante todo, un fenómeno biológico natural —independientemente de la producción que ofrezca la inteligencia artificial. Como tal, es coherente abordar la cognición del mismo modo que cualquier otro fenómeno biológico. Esto comporta asumir —como dice Pamela Lyon— un grado significativo de la continuidad entre diferentes tipos de organismos —cada vez más corroborado por la biología comparativa, en especial la genómica— estudiando modelos de sistemas más simples, como microbios, protistas, etc., para comprender los principios básicos que modelan los procesos cognitivos más complejos como de los primates o los humanos.

De hecho, como dice Ladislav Kovác (2006): “la biología cognitiva es más una reinterpretación de los datos existentes que un programa de investigación que ofrecen nuevos enfoques experimentales para viejos problemas” (2006). Es un nuevo enfoque de los paradigmas biológicos que necesitan de una contextualización significativa coherente, tanto de los datos experimentales como de un desarrollo semántico de la biología. Es decir, una biohermenéutica que conecte informaciones de diferentes estudios y permita programas de investigación transdisciplinarios que provoquen nuevos problemas abiertos entre las ciencias biológicas. Aún más, estos problemas en las ciencias biológicas repercuten en las ciencias humanas hacia un método de estudio sistémico de la complejidad, un “bio-humanismo ²²”. Dicho método integra nuevas reformulaciones de los sistemas vivos, de los procesos cognitivos y de los sistemas inteligentes.

Un sistema es vivo cuando [éste] se mantiene por sí mismo gracias a una red de regeneración de procesos que tienen lugar dentro de los límites de su propia creación, y que tiene una la interacción cognitiva de adaptación con el medio (Luisi y Damiano 2010; Gayon 2010).

Por “sistemas inteligentes” se entiende el comportamiento autoinducido y aprendido en el contexto de sistemas complejos, que implican interacción y retroalimentación. Un sujeto como “sistema inteligente” se dedica con éxito y de forma productiva a interactuar globalmente con su medio ambiente. Esto se percibe como parte de un todo, la influencia del todo sobre sí mismo, así como su propia influencia sobre el conjunto. Mediante la observación de su propia interdependencia, es capaz de actuar con inteligencia (Hämäläinen y Saarinen 2004).

Por eso, el interés por una nueva reformulación del concepto de proceso cognitivo y de inteligencia requiere una comprensión más profunda de la conducta de los sistemas vivos, en donde la cognición no depende de la existencia de un sistema nervioso que lo canalice, sino de circuitos funcionales que permiten la percepción mínima del medio envolvente y de su procesamiento biosemiótico *in vivo*.

Gregory Bateson lo formulaba con la expresión de “mente”, aludiendo en ella el mismo sentido que los “procesos cognitivos” de la teoría de Santiago ²³. Introdujo seis criterios fundamentales para el “proceso mental ²⁴”:

- 1 Una mente es un agregado de partes o componentes interactuantes. Es idéntico al concepto de red autopoiética, que es una red de componentes interactuantes.
- 2 La interacción de las partes de la mente se desencadena por la diferencia. Aplicable, por ejemplo, a la distinción de gradientes de temperatura y químicos por parte de las bacterias.
Según Bateson, “toda recepción de información es necesariamente una recepción de noticias de diferencia, y toda percepción de diferencia queda limitada por un umbral. (...) Resulta difícil discriminar entre un cambio lento y un estado. Hay, por fuerza, un umbral de gradiente por el cual el gradiente no puede ser percibido ²⁵”.
- 3 El proceso mental requiere de una energía colateral. Mientras que Maturana describe la respuesta de un organismo con criterios de acoplamiento estructural y patrones no lineales de organización, Bateson lo hace en términos de energía.
4. El proceso mental requiere de procesos circulares (o más complejos) de determinación. Los patrones no lineales llevaron a Maturana al concepto de autopoiesis, y el de causalidad no lineal al de estructuras disipativas y procesos no reversibles de Ilya Prigogine.
5. En el proceso mental, los efectos de la diferencia deben de ser vistos como transformaciones (es decir, versiones codificadas) de sucesos que los han precedido.
6. La descripción y clasificación de estos procesos de transformación revelan una jerarquía de prototipos lógicos inmanentes en los fenómenos.

Esto es asumible en la definición de la autopoiesis como “la lógica de la vida celular” (Luisi 2006). A lo que se puede estudiar un criterio de “superveniencia ²⁶” entre niveles jerárquicos de autorganización y de los procesos cognitivos sobre las propiedades bioquímicas y físicas como “causación descendente” (Pérez Otero 1994; Moreno y Urmendez 2000).

Estos criterios de Gregory Bateson sobre los procesos cognitivos han dado paso a nuevas expresiones biogénicas de la cognición, que en la actualidad configuran los aspectos estructurales de la biología cognitiva y que Pamela Lyon sintetiza en:

1. Continuidad: Las capacidades cognitivas complejas han evolucionado de las formas más simples de la cognición. Hay una línea continua de descendencia significativa. (No descartar la aparición de nuevas capacidades con mayor complejidad.)

2. Control: La cognición, directa o indirectamente, modula los procesos físicoquímicos que constituyen un organismo.
3. Interacción: La cognición facilita el establecimiento de las relaciones recíprocas de causalidad con las características del medio ambiente, dando lugar a intercambios de materia y energía, que son esenciales para la persistencia continua del organismo, el bienestar o la reproducción.
4. Normatividad: La cognición se refiere a la evaluación (más o menos) continua del sistema de necesidades relativas a las circunstancias imperantes, el potencial de interacción, y si la interacción actual está funcionando o no.
5. Memoria: La cognición requiere la capacidad de retener información durante un periodo de tiempo mayor que cero.
6. Selectividad: Debido a que un organismo es capaz de interactuar provechosamente con algunas, pero no todas, las propiedades del medio ambiente, la cognición implica la diferenciación de algunos estados de los asuntos de otros estados de cosas.
7. Valencia: Con relación a las necesidades del organismo y/o experiencia, diferentes propiedades del medio ambiente se invertirán con diferentes grados de fuerza o importancia, tanto positivos como negativos.
8. Anticipación: La cognición está intrínsecamente orientada hacia el futuro (¿qué pasa después?) y por lo tanto, a lo predictivo.
9. Reducción de la aleatoriedad: Los sistemas biológicos reducen y modulan la influencia de las perturbaciones aleatorias sobre el funcionamiento de la cognición como mecanismo y, por consiguiente, es resistente a las perturbaciones.
10. Interdependencia: Las vías bioquímicas que inervan la cognición están íntimamente ligadas a las de otras funciones biológicas, lo que hace difícil la delimitación y en gran medida una función de objetivos explicativos (El mapa no es el territorio ²⁷) (Lyon 2006).

5. EL CASO DE LAS AMEBAS INTELIGENTES Y DE LAS BACTERIAS SOCIALES

5.1. COGNITISMO EN LOS HONGOS MUCILAGINOSOS

Uno de los ejemplos más claros y a su vez más sorprendentes de comportamiento inteligente en biología cognitiva ha sido el revisado a través de auténticos hongos mucilaginosos o mixomicetos. Los *Physarum polycephalum* son una especie de mixogastreos o mixomicetos que varían su estructura plasmodio u ameboide a esclerocio dependiendo de las variables favorables o desfavorables del entorno y de sus necesidades alimenticias. Cuando su estado es de ameba, son auténticos plasmodios polinucleares

con una sola membrana, lo que mantiene una unidad topológica, algo significativo en su descripción como sistema autopoietico.

Se ha demostrado que el *Physarum polycephalum* puede encontrar la ruta más corta a través de un laberinto para localizar las fuentes de alimentos colocados en las salidas, y así absorber la máxima cantidad de nutrientes en el menor tiempo posible ²⁸ (Nakagaki, Yamada y Toth 2000; Nakagaki 2001). Esto sugiere que la célula es capaz de un comportamiento “inteligente” —según los parámetros que hemos visto anteriormente con Hämmäläinen y Saarinen (2004)— incluso en situaciones complicadas en que es difícil optimizar las tareas de supervivencia. Dos son las cuestiones importantes que plantea esta hipótesis: ¿De qué modo es este comportamiento y cómo se llegó a una solución “inteligente”?

La red de transporte en hongo mucilaginoso plasmodial es un sistema útil para abordar estas cuestiones. El plasmodio *Physarum polycephalum* es un agregado de protoplasma con una red de elementos tubulares y nutrientes, a través del cual circulan las señales químicas, cuya geometría está relacionada con la comunicación interna. Por otra parte, los tubos actúan como “canales”, lo que permite al organismo navegar por su entorno, y puede desmontarse y ser reensamblado en pocas horas en respuesta a los cambios del entorno. Este sistema es, por tanto, muy adecuado para el estudio de la morfología y el comportamiento celular “inteligente”. Cuando muchas pequeñas fuentes de alimentos —bloques de agar que contiene copos de avena— se presentan en diversas posiciones a un plasmodio hambriento, éste se esfuerza para llegar a todos ellos; como consecuencia, sólo unos pocos tubos están en contacto con cada fuente de alimento. El organismo trata de optimizar la forma de la red para facilitar la absorción de los nutrientes disponibles. Esto podría ser difícil de lograr cuando múltiples fuentes de alimentación se presentan debido a la limitación de la masa corporal del organismo (Ball 2008; Nakagaki, Yamada y Toth 2000).

Los efectos de dos fuentes de alimentación han sido previamente estudiados, y la minimización de la longitud total de la red resultó tener un papel importante. Esta red en forma de cuerpo permite ciertas soluciones a necesidades fisiológicas que deben cumplir: 1. La absorción de los nutrientes desde la fuente de alimentos de la forma más eficiente posible, porque casi toda masa corporal se encuentra en las fuentes de alimentación para permitir la absorción; 2. El mantenimiento de la conectividad y la comunicación intracelular en todo el organismo, y 3. La reunión de la limitación de los recursos de la masa corporal. La red formada se considera como una solución para los problemas de supervivencia del organismo.

Contrariamente, si la comida es abundante, el organismo finalmente se divide en dos piezas sobre las dos fuentes de alimentación. Incluso en este caso, justo antes de la división, el organismo traza tan solo la distancia más corta. Por lo tanto, la conexión más corta aparece una vez como forma

transitoria y por último es desconectado, entonces el resultado de la desconexión es la separación del organismo. Los puntos clave del comportamiento inteligente del *Physarum polycephalum* se encuentra en, primero, que para alcanzar los pedacitos de avena decide realizar la ruta más corta posible para obtener el alimento de cada fuente y, segundo, que para realizar la trayectoria tiene que predecir su ruta, pues no establece rutas en forma de ensayo-error, sino que todo lo hace a la primera. Para generar dicho movimiento es necesario un sistema de control de la información del *Umwelt*, y un sistema de comando que tome las decisiones.

A raíz de este descubrimiento de conducta inteligente y no trópica de los mixomicetos, Nakagaki y sus colegas hicieron estudios matemáticos sobre las posibles rutas de navegación, aplicadas a localizaciones de caminos eficaces respecto del terreno accidentado, por el territorio norteamericano (Nakagaki, Kobayashi y Tero 2006). En un último experimento, estudiaron las redes de transporte descentralizadas de los *Physarum polycephalum* emulando el sistema ferroviario de Tokio (Tero, Takagi, Saigusa, Ito, Bebbber, Fricker, Yumiki, Kobayashi, Nakagaki 2010) bajo los modelos biomatemáticos anteriores y nuevas propuestas topológicas que emularon propiamente la red real existente (Nakagaki y Guy 2008).

Para estudiar los mecanismos de aprendizaje de los *Physarum polycephalum*, utilizaron los mixomicetos para exponerlos a condiciones adversas presentadas con tres pulsos consecutivos a intervalos constantes. De ese modo, redujeron su velocidad de locomoción en respuesta a cada episodio. Cuando posteriormente los plasmodios fueron sometidos a las condiciones favorables, espontáneamente redujeron su velocidad de locomoción a tiempo de que el siguiente episodio desfavorable pudiera haberse producido. Esto implicaba la previsión de la inminencia de los cambios ambientales. Así es como Nakagaki y sus colegas han explorado los mecanismos que subyacen en un comportamiento anticipatorio a partir de una perspectiva de sistemas dinámicos no lineales (Nakagaki, Kobayashi, Nishiura y Ueda 2004).

La conclusión a que se ha llegado es que el organismo es capaz de recordar los cambios periódicos, aunque no los ha experimentado antes. Esto indica que el organismo tiene una capacidad generalizada para el aprendizaje, la memoria y la anticipación, independientemente de los detalles de la periodicidad.

Aunque los resultados descritos en el trabajo se obtuvieron a través de auténticos hongos mucilaginosos —o mixomicetos— los organismos procariontas, como las bacterias, pueden demostrar un comportamiento “inteligente” con un mecanismo simple de aprendizaje y de memoria en términos de dinámica no lineal. La perspectiva de la dinámica no lineal podría ser la clave para revelar el secreto de cómo los sistemas biológicos

superan los retos para su supervivencia (Takamatsu, Takaba y Takizawa 2009).

Es interesante saber que los estudios de dinámica no lineal de Nakagaki introducidos en este trabajo comprenden un comportamiento de osciladores multirítmicos en el estudio de la motilidad (Kobayashi, Tero y Nakagaki 2006). Se puede considerar que los plasmodios *Physarum polycephalum* actúan como un sistema de osciladores acoplados, basándose en la teoría de bifurcación de Hopf y que resuelve algunas de las propiedades simétricas definidas en la dinámica oscilatoria de concentración de ATP o de Ca^{+} , el grosor del plasmodio y el flujo protoplasmático ²⁹ (Takamatsu, Tanaka, Yamada, Nakagaki, Fujii y Endo 2001). Toda esta orquestación de osciladores permite la estabilidad estructural y morfológica en sus múltiples estados. Podemos expresar, en palabras del padre de la biosemiótica, Jakob von Uexküll, que

el sonido de significación se establece repentinamente y desencadena la orden de creación en la forma de los sonidos del yo (*ich-ton*) de los elementos celulares de los mixomicetos, los cuales se ordenan en sonidos de diferente afinación y, correspondiendo a la creación de la forma (morfogénesis), permiten el desarrollo de la melodía establecida de antemano (Uexküll 1942).

Como decía Uexküll a propósito del plan de significación de los mixomicetos:

Todo ser vivo se halla constituido, como todos sabemos, aunque con facilidad lo olvidamos, en oposición a todos los mecanismos, no de partes, sino de órganos. Un órgano es siempre un producto formado por células vivas, cada una de las cuales posee un sonido propio. El órgano, como totalidad, tiene su sonido orgánico, que es su sonido de significación (Uexküll 1942).

Este “sonido de significación” o “sonidos del yo” (*ich-ton*) serían comprendidos como los aspectos semánticos de las oscilaciones multirítmicas del propio sistema (de los órganos y del organismo su totalidad) en su desplazamiento (Kishimoto 1957a, 1957b; Miyake, et al. 1993) y en su desarrollo (Takamatsu, Takaba y Takizawa 2009), desde una perspectiva “enactiva” y “subjetal” ³⁰ de la interacción entre su *Innenwelt* —o mundo fenomenológico del organismo— y su *Umwelt* —o “campo de percepción multisensorial del entorno” ³¹. Por lo que habría una descripción biosemiótica de las oscilaciones con la caracterización de agente en su estatus autopoietico y, por lo tanto, propioceptivo (gracias a proteínas contráctiles como la actina, la miosina y la tubulina, etc.), interoceptivo (gracias a las señales intracelulares como AMPc, GTPc, Ca^{+} , PIP3, etc.) y exteroceptivo (gracias a la quimiotaxis, la haptotaxis, o la termotaxis, etc.).

“No hay que pasar por alto el hecho de que nosotros adscribimos a la ameba del mixomiceto un *Umwelt*, aun cuanto limitado, propio de todas las amebas, en el cual las bacterias se hacen notar como portadores de una significación en su *Umwelt*, y además son percibidas y creadas” (Uexküll 1942). Estas bacterias, que forman parte del *Umwelt* de los mixomicetos como portadores de significación alimenticia por quimiotaxis, también presentan comportamientos inteligentes de comunicación y de cooperación en su agregación y desplazamiento (Jacob, Becker, Shapira y Levine 2004).

5.2. LA INTELIGENCIA SOCIAL DE LAS BACTERIAS

Como hemos visto con los mixomicetos, el desarrollo organizativo y coordinado de la conducta de los organismos depende de la comunicación con su entorno, tanto abiótico (factores ambientales y sustancias del medio inmediato) como biótico (entre organismos de la misma especie o de especies y/o reinos diferentes). En el caso de las bacterias, los procesos comunicativos que se han estudiado son de tres tipos: intra-, inter- y metaorganísmico (Witzany 2008). Las bacterias pueden distinguir entre señales específicas de especies y señales que son capaces de modular conductas interespecíficas, permitiendo de este modo coordinar conductas concretas de la especie, así como de diversas especies (Shauder y Bassler 2001).

En condiciones normales de crecimiento, las bacterias viven en comunidades jerárquicas muy complejas. Para poder construir dichas comunidades o colonias, han de ejercer conductas cooperativas en las que algunas de las células de forma altruista ofrecen su vida para la alimentación de otras en las formaciones de cuerpos fructíferos, como ocurre por ejemplo con los *Myxococcus xanthus*. Los patrones complejos de formación de una colonia emergen a través de interacciones basadas en la comunicación entre bacterias individuales de la colonia (Ben-Jacob 2009). Las células individuales asumen nuevos rasgos cogenerados y habilidades que no están pre-almacenadas en la información genética de las células, es decir, que no toda la información requerida para responder eficientemente a las condiciones del entorno están almacenadas genéticamente. Esto responde a la afirmación de Gregory Bateson, de que el ambiente ejerce un impacto directo en el patrimonio genético de la población, aunque no es cierto de que el impacto ambiental pueda gravitar en los genes de cada individuo de forma genética³².

Cuando una célula recibe una señal a través de un receptor, se inicia una serie de pasos en una red interna de interpretación, que puede llevar un factor de transcripción para activar una zona de su genoma. Esto, a su vez, puede activar una red de genoma completo. Así, el significado de una señal depende de las complejas interpretaciones hechas a cabo por la

célula receptora. El contenido informativo de la señal se ve reforzado a través de un mapeo de interpretación. Sin embargo, no todo el contenido informativo requerido para responder con eficiencia a las condiciones del *Umwelt* viene almacenado o preestablecido en el código genético.

Para resolver la incompletitud informativa, las bacterias evalúan dicho problema a través de detección de colectivos (*collective sensing*), recordando la información almacenada de la experiencia pasada (memoria epigenética³³), y luego ejecutan la distribución del procesamiento de información de un colectivo entre las 10^9 y 10^{12} bacterias agrupadas en la colonia: la transformación de la colonia colectiva en un supraorganismo es lo que Ben-Jacob (2009) denomina un “supercerebro”. Un supercerebro compuesto entre 10^9 y 10^{12} “nanocerebros” de la morfología de un pelo (Strock y Levit 2000). Se trata de unas fibras en forma de bobinas α -helicoidales receptoras de quimiotaxis bacteriana conservadas en los dominios citoplasmáticos. Cada unidad de señalización (que conforma el supercerebro) parece ser un campo de varios miles de millones (según Ben-Jacob) de elementos receptores helicoidales, embalados en un paquete de 100 nm de diámetro aproximadamente, cuya dinámica arquitectónica sigue una lógica determinada por las reglas de asociación entre TSCT (Stock, et al. 2000) como la CheW, la CheA y la CheY (el receptor se señala, el donante de fosforilo —la histidina quinasa— y su regulador de respuesta —una proteína mensajera del ácido aspártico) y el andamiaje de fibras receptoras α -helicoidales.

El comportamiento inteligente de las bacterias despierta la atención a los actuales estudios biosemióticos (Witzany 2008a, 2008b, 2007, 2006). Las bacterias han desarrollado capacidades de comunicación compleja (por ejemplo, el *quorum-sensing*, señalización quimiotáctica y el intercambio de plásmido) para autorganizarse cooperativamente en colonias altamente estructuradas con elevada capacidad de adaptación al medio ambiente. Eshel Ben Jacob y sus colegas proponen que la bacteria use su flexibilidad intracelular, participando en redes de transducción de señales y en la plasticidad del genoma, para mantener colectivamente comunicación lingüística: la interpretación propia y colectiva de señales químicas (sintaxis), el intercambio de mensajes químicos (semántica) y los diálogos (pragmático). El sentido de la comunicación basada en permisos de identidad colonial, la determinación intencional (por ejemplo, a partir de autoinductores o feromonas para el cortejo de apareamiento), la alteración deliberada de la estructura de la colonia (por ejemplo, formación de cuerpos fructíferos), la toma de decisiones (por ejemplo, esporas), el reconocimiento y la identificación de otras colonias, son funciones que podría empezar a asociarse con una inteligencia social bacteriana. Esa inteligencia social, en caso de que exista, sería necesario ir más allá de la comunicación para abarcar el proceso desconocido intracelular adicional para generar memo-

ria de herencia colonial y un contexto común del genoma (Ben-Jacob, Becker, Shapira y Levine 2004).

El criterio de comunicación célula a célula, en este caso en las bacterias, conlleva los procesos de transducción y decodificación de sus señales —un tipo de vocabulario semioquímico (Witzany, 2008a, 1995)— a través de componentes como las homoserina lactonas LuxI y LuxR —en el caso de las *Vibrio fischeri*— para la autoinducción o *quorum sensing*, o la serina-treonina quinasa como receptores intracelulares capaces del factor de crecimiento transformante (en la formación de genes que regulan y controlan los procesos mitóticos y meióticos) y de regulador de la presión con el entorno en el caso del *Bacillus subtilis* (Kang, et al. 1996), aparte de colaborar en procesos neurológicos e inmunológicos ³⁴ (García Martínez 2007). El profesor Klaas J. Hellingwerf expone que al estudiar las características de transferencia de señales en las bacterias, éstas presentan características funcionales supervenientes en organismos superiores, como la memoria, el aprendizaje y la inteligencia de forma rudimentaria pero declarable y distinguible (Hellingwerf 2005). Además, pueden no sólo imitar características típicas de redes neuronales, sino que determinadas proteínas que intervienen tanto en la comunicación bacteriana para el crecimiento o su paralización (Tal, et al. 1998), como en la detección de luz (Barends, et al. 2009), también son actuantes en procesos neuronales, como la neuroplasticidad, y como potenciadores cognitivos en el caso de inhibidores de la fosfodiesterasa, como puede ser la vinpocetina ³⁵ (Medina, et al. 2006). En este último caso ³⁶ (Aravind y Pointing 1999), estamos ante un sistema de dos componentes de transducción de señales (TCST), en los que ciertas moléculas convierten un mecanismo de estímulo químico en una señal de respuesta celular específica, ofreciendo un cambio en la función celular. Se trata de un mecanismo sensoriomotor, que actúa también como una forma molecular de memoria requerida para la quimiostasis. Está mediado por un par de proteínas que consisten en un sensor (S) o receptor y un regulador de respuesta (RR) adaptativa. Percepción y adaptación son dos líneas de actuación de señalizaciones, a través de lo que Uexküll denominaba “circuito funcional” o *feedback* sobre los receptores bacterianos. Curiosamente, algunos de los TCST implicados en la *E. coli* (y, por tanto en las procariotas), también lo están en algunas eucariotas —como en los mixomicetos— actuando también en redes neuronales, como mecanismo de acoplamiento de base estímulo-respuesta para permitir que los organismos detecten y respondan a los cambios del *Umwelt*, es decir, del medio circundante que es “portador de significación” (Uexküll 1940). Es el caso de la proteína histidina quinasa que, actuando como transmisor en la *E. coli*, también interviene como regulador de respuesta en la ósmosis de los mixomicetos ³⁷ (Shuster, et al. 1996; Stock, Robinson y Goudreau 2000).

La percepción del entorno, así como la coordinación sensomotora de los organismos unicelulares competen como fundamentos de un principio cognitivo mínimo que va más allá de los procesos metabólicos. Se trata, tanto en el caso de los mixomicetos, como de las bacterias, del reconocimiento del entorno, de los procesos significativos de aprendizaje en la diferenciación entre entorno hostil u óptimo, y en las transformaciones físicas de cada organismo en función de las señales recibidas tanto en la membrana como en el interior de los organismos. Los mecanismos de coordinación sensomotora expanden las formas de adaptación metabólica. Algunos de estos mecanismos de coordinación están ligados a la percepción con el entorno a través de pulsos, según el procesamiento temporal de las señales. Aun así, no puede haber una recepción correcta de los pulsos si no existe una estructura celular estable tridimensionalmente, que soporte la dinámica de fluctuaciones del entorno, sea un medio circundante fluido y heterogéneo al citosol, sea por detección por contacto (háptico) con otros organismos celulares. Por lo anterior, suponemos un sistema complejo de andamiaje que permite un control adecuado entre la contracción y la tracción celular, que posibilite una mayor recepción de las señales del entorno que son las responsables del control del comportamiento celular.

6. TENSEGRIDAD COMO PRINCIPIO DE ACTIVIDAD INTELIGENTE

Uno de los factores importantes para comprender la estabilidad estructural y morfológica de los seres vivos está en la arquitectura de su construcción. Si lo estudiamos a nivel del cuerpo humano, el esqueleto es el que confiere la estabilidad, nuestra verticalidad y nuestra movilidad. Al igual que los esqueletos (tanto intro como exoesqueletos) a nivel celular está el citoesqueleto como conformador de volumen, como red de transporte de componentes inter e intracelulares, así como para el mantenimiento de los orgánulos.

Investigadores como Donald Ingber, D. Stamenovic y K. A. Lazopoulos, entre otros, muestran desde la década de los noventa que la arquitectura de la tensegridad está detrás de las complejidades de los patrones estructurales que se observan en el citoesqueleto celular y en la elasticidad o rigidez de sus membranas (Lazopoulos 2005; Pirentis y Lazopoulos 2009). La tensegridad o integridad tensional —terminología creada por el arquitecto Richard Buckminster Fuller en los sesenta— es la característica que exhiben determinadas estructuras, cuya estabilidad depende del equilibrio entre fuerzas de tracción y de compresión en formas de pretensados, triangulaciones o de geodésicas. “La tensegridad define un principio de relación estructural en el cual la forma de la estructura está garantizada

por el continuo y finitamente cerrado comportamiento de los elementos traccionados del sistema y no por el discontinuo y localizado comportamiento de sus elementos comprimidos" (Fuller 1975).

Si en la estructura celular se encuentra en cierto estado de "autoequilibrio" estable, no sólo se mantiene un sistema de tensegridad, también obtiene una sinergia (*synergetics*) que permite un balance energético en el sistema de cara a evitar disipación energética y por tanto el agotamiento, el estrés, recuperando su forma. De esta forma, se obtiene una pauta, un patrón fundamental de la autopoiesis estructural o "tensegridad autopoietica", que establece una estrecha vinculación entre la geometría —concretamente la topología— y la física con la autorganización (Haken 1977, 1987), la autorreproducción, el autoensamblaje, el autocatálisis, y sobre todo en dos factores fundamentales: la autoconservación —expresada en la alimentación y en la adaptabilidad con el medio inmediato— y la motilidad o autodesplazamiento. En estos dos factores (la autoconservación y la motilidad) se concentra la fenomenología autopoietica que se identifica con patrones cognitivos. Por eso la tensegridad forma parte de la estabilidad, no sólo estructural, sino autopoietica. Y como tal establece la capacidad de la actividad sobre el entorno percibido (*Umwelt*) y sobre sí misma (*Innenwelt*). Esta capacidad de actividad ocurre gracias al procesamiento de información del entorno y de su interior, de la transducción mecánico-química —también llamada "mecanotransducción" (Ingber 1997; Stamenovic, et al. 1996)— para la motilidad y para la adaptabilidad con las microvariables del entorno, como los gradientes termodinámicos, o de concentración de azúcar, el pH, etc.

En el caso del *Physarum polycephalum*, éste pasará de un estado ameboide en un entorno favorable a un estado esclerocio en entornos desfavorables o en estado de mínimos —como en la prueba del laberinto (Nakagaki, et al. 2000). Se observa la actividad de tensegridad en la estructura del mixomiceto, tanto en los microtúbulos como en los filamentos de actina, que le permite permanecer íntegro. Cuando el plasmodio se desplaza, la vectorización de los microtúbulos (tanto del centrosoma como del citosol) y de la actina-miosina se polariza, junto con el núcleo, restructurándose hacia la dirección y el sentido de desplazamiento de la ameba (Ueda, et al. 1999). Así observamos que la actividad de los microtúbulos es fundamental para el desplazamiento de las amebas, junto con la actina-miosina que provoca las contracciones oscilatorias periódicas, y al ser estos elementos altamente ordenados, incluso han sido investigados, en tanto detectores de fuentes de señales débiles³⁸ y de radiaciones electromagnéticas, como órganos de 'visión' para las células (Albrecht-Buehler 1992). Por ejemplo, el centrosoma es capaz de integrar las señales exógenas y enviar señales de respuesta a lo largo de los microtúbulos a diversos sitios dentro de la célula, haciendo actuar a los microtúbulos como nervios (Albrecht-Buehler

1998). Se está llegando a conclusiones sobre la no aleatoriedad de la motilidad celular, incluso que las células son capaces de medir los ángulos y los intervalos de tiempo³⁹. Aún más, es interesante saber que la geometría del centriolo no es caprichosa y se debe a la maximización de la tensegridad en su función en el huso mitótico (Albrecht-Buehler 1991).

Por otro lado, Olga Sozinova y colegas hablan de que la permanencia en cuerpo fructífero de mixobacterias no es debido a la quimiotaxis, sino por interacciones mediante contacto (Sozinova, et al. 2005). Me pregunto si estas interacciones tienen algo que ver con las percepciones hápticas que nos permiten tener información táctil del objeto contiguo o de aquello que percibes del entorno. Es posible que un teselado celular (un mosaico) pueda tener perturbaciones del entorno por presión, o por reproducción masiva y entonces se altera la tensegridad celular hasta un umbral de resiliencia que esté medido por un umbral crítico de densidad de población. Es decir, que el estrés que adquiere un biofilm puede ser debido a una relación entre el umbral crítico de densidad de población y el umbral crítico de tensegridad que permite la resiliencia o la recuperación de la forma topológica de las células teseladas. Por eso podemos considerar a la tensegridad del citoesqueleto como una adecuación inteligente (Skelton y Sultan 1997) para la conformidad estructural (*Bauplan*) de los organismos unicelulares, y para la retroalimentación entre el *Umwelt* y el *Innenwelt* en la continua transducción de señales.

7. TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN E IRRITABILIDAD CELULAR: EL PROCESO COGNITIVO MÍNIMO Y LA LEY DE WEBER-FECHNER

Existen muchas razones, no sólo teóricas, para aceptar que haya procesos cognitivos en los organismos biológicos carentes de sistema nervioso, como las expuestas por Maturana y Varela de cara a la explicación de los sistemas autopoieticos. Hemos visto que tanto en hongos mucilaginosos como en las bacterias existen procesos cognitivos que desentrañan comportamientos inteligentes, teniendo en cuenta el concepto de sistema inteligente definido por Raimo Hämmäläinen y Esa Saarinen —tanto en el ámbito de la memoria y reconocimiento de patrones (mixomicetos) como en el ámbito social (bacterias). De hecho, hay más estudios que observan lo que Pier Luigi Luisi, B. S. Müller y Fred Keijzer denominan “mínimo cognitivo” (Keijzer, Duijin y Franjen 2006; Müller, di Primo y Lengeler 2001; Luisi 2006) que permite establecer diferencias entre sistemas vivos con sistemas no vivos (como vacuolas o micelas), al igual que la coemergencia de la unidad autopoietica con la actividad cognitiva (Luisi 2006). Una de las cosas que es importante tener en cuenta es que no existe un foco o núcleo inteligente, sino que se trata de una emergencia en el propio sistema (Luisi 2006). Emergencia que podría originarse en actividades

bioquímicas teleonómicas (Kováč 2006) propias de sistemas autopoieticos, como el “reconocimiento molecular”. Estas consideraciones nos permiten sumergirnos bajo una perspectiva biosemiótica de primer nivel (Matsuno 2008) donde las transducciones de señales bioquímicas convierten a éstas en información reconocible, y por tanto sensible a nivel macromolecular del entorno —las transiciones reológicas de sol a gel del citoplasma (Sato, Wong y Allen 1983; Sultan, Stamenovic, Ingber 2004; Stamenovic 2005)— o las percepciones hápticas entre membranas celulares en el caso de la generación de teselados (Shirakawa, Adamatzky, Gunji y Miyake 2009).

Ahora bien, hemos de tener en cuenta un tema capital en estas actividades de reconocimiento de información: el propio concepto semántico de información. La semántica de las señales (y, en general, el lenguaje) se rige por el enriquecimiento (Werner y Vedral 2010). El significado enriquece el contenido de la información de una señal. Más aún, como dice Bateson, la información consiste en diferencias que establecen una diferencia ⁴⁰.

Según comenta Vlatko Vedral, en la adición de información, ésta permite respuestas muy sofisticadas a través de sencillas señales. Por eso, *la información contenida en un mensaje intercelular no está contenida en la señal*, en la probabilidad de la señal de ser enviada, o su valor sorpresa para el receptor. Por lo tanto, la teoría de Shannon es casi irrelevante para la comprensión de la información y la comunicación que se desarrollan en estos procesos. Argumenta Vedral que el significado de un mensaje está determinado por cómo afecta a la información y al estado intencional del agente. Los agentes coordinan sus acciones mediante el uso de la comunicación para ajustar sus respectivas estrategias, para que se cohesionen y lograr así sus objetivos de enclavamiento (Werner 1989). Esto tiene poco que ver con la probabilidad de una señal, y por eso la teoría de Shannon aquí no dice nada sobre el significado y la comprensión del lenguaje.

Como Andrey Kolmogorov da a entender, la complejidad de una cadena no puede ser mayor que el programa mínimo que lo genera y lo detiene. Podemos resumir esto en un principio de conservación complejo que se aplica a todos los eventos espacio-tiempo generados por los agentes con significados estratégicos e información del estado (Werner 1996).

Esto nos lleva de nuevo a la idea de Bateson de que, al ser la información de naturaleza relativa, la diferencia no está situada en el tiempo ni en el espacio (no está contenida en la señal). Esto nos acerca a un tema que está ligado a la cuantificación de la cognición. Esto quiere decir que existe un límite en el reconocimiento de la diferencia de estímulos abióticos o bióticos del *Umwelt* donde no hay procesamiento. Ha de haber, por fuerza, un umbral de gradiente por debajo del cual éste no puede ser percibido, y por lo tanto ha de existir una ley que rija el umbral mínimo de percepción que permita las tres condiciones indispensables que definen a un agente:

su individualidad, la asimetría interactiva y la normatividad (Barandiaran, Di Paolo y Rohde 2009). Una ley “superveniente” o un equivalente homeomórfico⁴¹ de la *ley de Weber-Fechner* (Cope 1976; Copelli 2002), en la que el menor cambio discernible en la magnitud de un estímulo ha de ser proporcional a la magnitud del estímulo: $s = k \ln (A/A_0)$ que relaciona la experiencia sensitiva (s) con la activación sensorial (A), donde k es una constante y A_0 es el nivel mínimo de activación sensorial en el cual no se presenta experiencia. En el progreso del estudio de la ley de Weber-Fechner, Stanley Smith Stevens (1906-1973) propuso una extensión de la misma denominada ley de Stevens (Stevens 1957), una ley de potencia $\psi = k\phi^\beta$ que relaciona la magnitud “subjettual”⁴² del estímulo (ψ) con la intensidad (ϕ) y la naturaleza de la estimulación (β) que se describe en dos clases de continuo sensorial: un continuo metatético o cualitativo que suponen variaciones en la cualidad o localización sensorial, y un continuo protético o cuantitativo que suponen variaciones en la magnitud sensorial.

Curiosamente, estas leyes psicofísicas estudiadas desde sus inicios⁴³ para la cuantificación objetiva de una sensación subjetiva en la psiquis humana, fue extrapolada ya en 1884 a la irritabilidad de organismos tanto unicelulares (bacterias y mixomicetos) como en las plantas gracias a Wilhelm Pfeffer (1884, 1888, 1906).

Pfeffer (1884) dispuso de organismos (como bacterias termófilas o espermas de helechos) moviéndose libremente en agua o en soluciones de materiales de estimulación como el ácido málico, con un exceso de concentración requeridos en tubos capilares para producir una atracción fobo-quimiotáctica. Como consecuencia del metabolismo (Hoshikawa y Saitô 1978; Hillen y Painter 2009), Pfeffer observó que si una bacteria se mueve hacia el gradiente de un atrayente, de más energía disponía la bacteria para continuar acercándose al atrayente. Pfeffer hizo diversas mediciones entre las concentraciones de ácido málico como atrayente respecto la cantidad de amoniaco para neutralizar la presión de atracción bacteriana en los capilares. Dejó constatado en las tablas de concentraciones que, buscando la disolución mínima para encontrar el umbral mínimo de irritación y variando la temperatura de condiciones ambientales hasta cinco grados Celcius, la variación de la concentración de ácido málico respecto a la respuesta umbral de irritación atrayente al capilar siempre seguía la ley de Weber-Fechner —tanto en termo bacterias⁴⁴ (Pfeffer 1884, Keller y Segel 1971), como en espermas de helechos, así como en mixomicetos (Pfeffer 1888, Ohta y Yoshimura 2005; Hillen y Painter 2009).

La irritabilidad de una célula forma parte del proceso cognitivo que permite describir la percepción de un estímulo, que responde de forma no lineal. Principalmente es una capacidad homeostática que permite a los organismos sobrevivir y adaptarse a los cambios ambientales. Al mismo tiempo, con esas adaptaciones conjugan una cantidad de interrelaciones

sensitivas “subjetuales” del *Innenwelt* del organismo que responden a la ley de Weber-Fechner ante el tropismo o la taxis frente a su *Umwelt*. Como diría Rodolfo R. Llinás (2003), una “sensación subjetiva” o “*protoqualia*”⁴⁵ que ofrecen una señal eléctrica o química como una función potencial de estímulo en el momento que desborda del umbral mínimo de percepción, desencadenando una acción celular coherente. Este puede ser el origen de los *qualia* —comenta Llinás (2001)— si se produce una amplificación geométrica de la irritabilidad de millones de bacterias para establecer el cuerpo fructífero, o de miles de millones de neuronas para establecer una función coherente sincrónica de movimientos de un brazo para ofrecer la mano a un homínido de su especie. Esta amplificación geométrica se cumple con la ley de Weber-Fechner. “Amplificación que es ofrecida gracias a la organización de circuitos especializados en funciones sensoriales” (Llinás 2003). Dichos circuitos sensoriales son precisamente los *Funktionkreises* o circuitos funcionales de Uexküll (1920) que permiten estructurarse de forma multicompleja en función de las especializaciones transductoras de señales, y la autoinducción de señales para la transferencia de información (Castro 2009). Una de las cosas que se establece en la estructura de la fórmula de Weber-Fechner es la progresión geométrica, basada en el número *e*, base de los logaritmos naturales, como hemos visto anteriormente en los estudios de Pfeffer, implica que los *qualia* se distribuyan como armónicos.

Este es el nexo de unión entre la percepción fenomenológica de los gradientes de intensidad de un estímulo y la sensación producida por ella. No sólo sería la prueba de que se pueden medir o cuantificar los procesos cognitivos, sino además el grado de percepción del estímulo. También en el aspecto epistemológico se establecería un nexo de unión entre un estudio biológico experimental de un fenómeno, cuya descripción está fundamentada por los “materiales” físico-químicos en los que están basados, con la descripción fenomenológica de un proceso emergente gracias a la identificación de sus partes actuantes o de sus componentes “materiales” interactuantes, que requiere de una energía colateral —consumo de entropía negativa y de información latente (Ben-Jacob, Shapira y Tauber 2006)— y también de circuitos funcionales de determinación, cuyos efectos se codifican de los sucesos que los precedieron (de forma normativa) revelando de esta forma una jerarquía de tipos lógicos propios del fenómeno que fundamentan la veracidad de su existencia.

8. CONCLUSIONES

Mi propuesta es que podemos desarrollar un discurso no sólo filosófico, sino también biosemiótico, y por lo tanto transdisciplinar, de las contribuciones existentes para fundamentar un cognitismo mínimo en organismos

que carecen de sistema nervioso para desarrollarlo. Son cinco las condiciones de posibilidad de determinación para un principio de cognitismo mínimo que hemos estudiado, tanto en los mixomicetos (*Physarum polycephalum* y *Dictyostelium discoideum*), como en proteobacterias gramnegativas ⁴⁶ (mixobacterias y *E. Coli*):

1. La capacidad de los organismos de discernir un entorno hostil del adecuado para la supervivencia. (Criterios cognitivos ⁴⁷ de selectividad, control, interacción y valencia.)
2. La capacidad de comunicación célula a célula. Dicha comunicación no sólo transmite información de las condiciones del entorno para fagocitar o huir, o de adhesión para formar el cuerpo fructífero, sino también la capacidad de comunicar sobre la comunicación, sobre la normatividad comunicativa, y por tanto la capacidad de establecer una “metacomunicación”, o tal como Bateson designa, una “jerarquía de prototipos lógicos”, que ofrece la capacidad de aprender acerca del contexto. (Criterios de normatividad, continuidad, memoria, control, interacción, selectividad e interdependencia.)
3. La capacidad de motilidad autónoma y su integración a una movilización colectiva cooperativa a través de movimientos oscilatorios acoplados ⁴⁸. (Criterios cognitivos de interacción, interdependencia, reducción de la aleatoriedad, control y continuidad.)
4. La reacción anticipativa ante señales fotolumínicas periódicas. (Criterios cognitivos de control, interacción, anticipación, memoria, valencia y reducción de la aleatoriedad.)
5. La determinación de umbrales de densidad de población a través de la tensegridad estructural del citoplasma y de la percepción háptica (haptotaxis, elasticotaxis) entre células contiguas o adyacentes. (Criterios cognitivos de valencia, interdependencia, control, memoria, selectividad, normatividad y continuidad.)

Todas ellas forman parte de la autorregulación y la autorganización de los organismos de cara a la “enacción autopoietica”, que confiere el significado de cognición en tanto que se trata de “círculos funcionales” mínimos. Esto ocurre tal como Uexküll describió como fundamento de una teoría de la significación en los organismos vivos; también es como Bateson determina en uno de sus criterios fundamentales para el proceso cognitivo —el cuarto criterio concretamente— al igual que en la teoría de Santiago de Maturana y Varela.

Hemos visto que la determinación de *quórum*, o autoinducción, es el responsable de un comportamiento social coordinado, y junto con la sincronización de pulsos oscilatorios permiten el control de las densidades de población (Gregor, et al. 2010), al igual que confieren la que se denomina una “memoria química de corto alcance” (Koshland Jr. 1980; Müller y

Thompson, 1986; Müller, di Primo y Lengeler 2001). Su fundamento epigenético está relacionado con la arquitectura celular optimizada para la transducción de señales gracias a una tensegridad autopoietica multimodular ⁴⁹. Por ejemplo, la aplicación de la tensión mecánica a las integrinas produce el mismo aumento del AMPc intracelular dentro y alrededor de las células, propagándose hacia células adyacentes. Dichas integrinas son glicoproteínas que, siendo moléculas de adhesión celular, permiten la mecanotransducción, participando en la unión entre células y la matriz extracelular, incluso en la unión célula-célula, por lo que las glicoproteínas determinan entonces la individualidad celular, su adhesión *Physarum* y su interacción intercelular.

En el caso de la adhesión celular tenemos, por ejemplo, que en los cuerpos fructíferos del *Myxococcus xanthus* su adhesión se realiza a través de hemaglutinina (MBHA) (Cumsky y Zusman 1979; Nelson, Cumsky y Zusman 1981, Cumsky y Zusman 1981 ⁵⁰); en el caso del *Dictyostelium discoideum*, la adhesión se realiza a través de proteínas Sib (Cornillon, et al. 2008 ⁵¹); y en el caso del *Physarum polycephalum* a través de semblantes de vitronectina (Nagano, et al. 1992; Miyazaki y Hayashi 1992 ⁵²).

Hemos visto que en los mixomicetos y las bacterias, como organismos primitivos aún permanentes en la historia del origen y de la evolución biológica, se han mantenido tanto la morfología como su fisiología prácticamente intacta (Baluška y Mancuso, 2009). De ellos hemos aprendido que, aunque los mixomicetos sean eucariotas y las bacterias procariotas, ambas mantienen principios de autorganización y de desarrollo autopoietico semejantes. Si Maturana estaba en lo cierto en la identificación entre autopoiesis y cognición —aunque dicha identificación no sea tautológica como observa Luisi— entonces los fundamentos bioquímicos y biofísicos que subyacen en la dinámica vital de desarrollo de los mismos, provocan una concepción “teleo-mecanicista” o “vitalismo-materialista” —según la acertada concepción de Lenoir— de cognición.

Como podemos comprobar, los fundamentos de un cognitismo mínimo en sistemas inteligentes no es una exclusividad de los organismos vivos superiores. Más bien comparten estos fundamentos todos los seres unicelulares animal y no animal, como los mixomicetos, las bacterias, las plantas e incluso las células endoteliales de los vasos sanguíneos, neuronas y células glia. A través de dichos fundamentos podemos establecer el conato entre el *Umwelt* y el *Innenwelt* del que Uexküll nos hablaba hace ya un siglo como “tonus ⁵³” (Uexküll 1909) y que conjuga como un “mínimo cognitivo” cuando los tonos son reconocidos entre semejantes, aparte de ser un condicionante biosemiótico fundamental para una posible fenomenología biológica o “biofenomenología” en los próximos años.

NOTAS

- 1 Barandiaran, di Paolo y Rohde definen el concepto de agente como un sistema que hace algo para sí mismo, de acuerdo con ciertas metas o normas sobre un entorno específico. Dicho sistema requiere de una individualidad, una asimetría de interacción con el entorno y una condición de normatividad generado por el sistema que regula la interacción internamente y enlaza directamente con los procesos de automantenimiento.
- 2 “Como biólogo que soy, por ejemplo, desde muy pronto, antes de los nuevos desarrollos, me puse a leer a Uexküll, y estuve muy impresionado por su análisis de la relación entre el organismo y el medio ambiente. Más adelante, me hice una pregunta que, por lo general, parece no ser seria, hasta que no se piensa su conclusión lógica —sobre todo desde que los científicos actúan como filósofos: ¿Qué es la cognición como un fenómeno biológico?”. Maturana, H. R. (1996) *Was ist Erkennen? Die Welt entsteht im Auge diciembre Betrachtens*. Goldmann Verlag. pp. 221.
 “Jakob von Uexküll entiende la vida como un ‘mundo vivido’ (donde Hans Jonas prefiere la autoidentidad) [...] Por definirse a sí mismo y, de esta manera, conformarse los dominios de sí mismo y del mundo, el organismo crea una perspectiva que cambia el mundo desde un lugar neutral para un *Umwelt* que siempre significa algo con relación al organismo. Los organismos, se puede decir que trascienden la neutralidad de la física pura y crean lo concerniente. Sólo esta perspectiva orgánica en realidad tiene la condición de ‘mundo’, sólo esto es real, porque la vida sólo puede actuar en la forma de un mundo intencional. La vida es así siempre subjetiva en el sentido fuerte de la palabra”. Weber, A.; Varela, F. J. (2002), “Life after Kant: Natural purposes and the autopoietic foundations of biological individuality,” *Phenomenology and the Cognitive Sciences* 1, pp. 97-125.
- 3 Pattee, H. H. (1978) “Biological systems theory: descriptive and constructive complementarity,” in G.J. Klir (ed.) *Applied General Systems Research*, New York: Plenum, pp. 511-520.
- 4 Esta “metacomunicación” científica es el desarrollo epistemológico que Gregory Bateson denomina “jerarquía de prototipos lógicos” que será también un criterio del proceso mental, y por tanto un asunto fenomenológico de la biología (Bateson 1979; Capra 1996).
- 5 Es un ciclo periódico autónomo, que en *Theoretische Biologie* (1920) Uexküll postula como maneras que la información se “alimente de nuevo” (*feedback*) y que ofrecería las primeras pautas de la biocibernética.
- 6 “La vida interior de un ser humano o de un animal, durante el mismo tiempo externo [periodo], pasa más rápido o más lento, y esta vida interior es el estándar con el que medimos el tiempo al observar [los procesos en] la naturaleza”. Baer, K. E. von. (1864), *Welche Auffassung der lebenden Natur ist die richtige?* En K. E. von Baer (ed.), *Reden gehalten in wissenschaftlichen Versammlungen und kleinere Aufsätze vermischten Inhalts*. Theil 1: Reden (pp. 257-258). St. Petersburg: Schmitzdorff. En: Wackermann, J., “Inner and outer horizons of time experience”, *The Spanish Journal of Psychology*, 2007, Vol. 10, No. 1, 20-32.
- 7 Uexküll conoció a Marey en 1899, cinco años antes de su muerte. Uexküll le compró a Marey una cámara cronofotográfica para estudiar tanto el movimiento de los animales invertebrados marinos (estrellas de mar, erizos, pulpos, etc.), como mariposas. Castro, O. (2009) *Jakob von Uexküll: El concepto de Umwelt y el origen de la biosemiótica*. Trabajo de investigación para la obtención

- del DEA. Departament de Filosofia, Universitat Autònoma de Barcelona. p. 137.
- 8 Müller, J. (1826), *Zur vergleichenden Physiologie des Menschen Gesichtssinnes des der Tiere*. C. Knobloch, Leipzig.
- Müller, J. (1838) *Handbuch der Physiologie des Menschen für Vorlesungen*. Hölscher J., Koblenz
- 9 Ortiz de Zárate, A. (2000), "Teorías sobre la conciencia en los últimos años", *Revista de Historia de la Psicología*, Vol. 21, N. 2-3, pp. 341-348.
- Norsell, U., Finger, S., Lajonchere, C. (1999), "Cutaneous sensory spots and the 'law of specific nerve energies': history and development of ideas," *Brain Research Bulletin* 48(5): 457-465.
- 10 Uexküll, J. von (1907), "Die Umrisse einer kommenden Weltanschauung", *Die neue Rundschau* 18: 641-661.
- 11 Pintos-Peñarada, M. L. (2002) "Aron Gurwitsch: Fenomenología de la percepción y encuentro con Kurt Goldstein", *Phainomenon. Revista de Fenomenología* 14 (2007), 255-277 / para la versión online: *Investigaciones Fenomenológicas* 6 (2008), 327-355; http://www.uned.es/dpto_fim/invfen/InvFen6/17_mluz.pdf
- 12 Baer, K. E. von (1864) *Reden gehalten in wissenschaftlichen Versammlungen und kleinere Aufsätze vermischten Inhalts*. Schmitzdorff. St. Petersburg, vol. I. Sobre todo el capítulo "Welche Auffassung der lebenden Natur ist die richtige? Und wie ist diese Auffassung auf die Entomologie anzuwenden?", pp. 237-284.
- 13 Castro, O. (2009), opus cit., p. 67.
- 14 "Lo más seguro es evitarlo lo más posible", Uexküll, Jakob von (1934), *Ideas para una concepción del mundo*. Espasa-Calpe. Col. Biblioteca de Ideas del Siglo XX. Madrid, p. 30, en Castro, O. (2009), opus cit., p. 74 y 101.
- 15 Castro, O. (2009) opus cit., p. 58.
- 16 Maturana, H. R. (1970), "Biology of cognition". Reimpreso en Maturana, H. R., Varela, F. J. (1980) *Autopoiesis: The Organization of Living Systems*, Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, p. 13.
- 17 Maturana afirma que "los fenómenos propios de la dinámica estructural de un ser vivo y los fenómenos propios de su realización e interacción con el entorno en el que se realiza, son fenómenos de distinta clase y no pueden ser reducidos unos a otros" (Maturana, H. R. (1995). "Origen de las especies por medio de la deriva natural, o La diversificación de los linajes a través de la conservación y cambio de los fenotipos ontogénicos", en *La realidad: ¿Objetiva o construida?*, Editorial Anthropos, tomo I, Barcelona, pp. 109.
- 18 Abierta como sistema de intercambio termodinámico y sensitivo, y cerrada como un sistema topológico consistente morfológicamente y homeostático fisiológicamente.
- 19 El neologismo "enacción" traduce el neologismo inglés *enaction*, derivado de "Enact", que viene a significar dos acciones: bien "promulgar" una ley (hacer la propuesta de ley, aprobarla y hacerla ejecutar, bien "representar" un papel teatral o declamar (haciendo vivir) un cuento, un suceso, etc.
- 20 En principio, la autopoiesis describe la absoluta "clausura organizacional" del sistema. Todo fenómeno sólo puede ser descrito dentro de esa delimitación-definición del sistema; o ni siquiera podrá ser descrito. Pero en esa clausura operacional, el sistema sigue abierto estructuralmente al entorno en cuanto que sus mecanismos o sensores permiten traducir impulsos externos a eventos internos (la "irritación", p. ej., producida en los receptores biológicos "informa" a la célula sobre eventuales cambios).
- 21 Castro, O. (2009), opus cit., p. 219.

- 22 Biohumanidades o biohumanismo es una perspectiva de la relación entre las humanidades (filosofía y sobre todo la historia de la ciencia), la biología y la sociedad. En esta visión, no sólo las humanidades comentan sobre el significado o las implicaciones de los conocimientos biológicos, sino que incrementan nuestra comprensión de la propia biología (Stotz y Griffiths 2008, p. 37).
- 23 Bateson afirmaba el concepto de “mente” desde modelos cibernéticos siempre como “proceso”, no como una “*res extensa*” cartesiana. Los procesos mentales están inextricablemente unidos a la naturaleza. Es importante anotar que mientras Bateson formulaba su concepto de “mente” por primera vez en Hawai en 1969, en un congreso sobre salud mental, Maturana presentaba en Chicago, en un congreso realizado por Heinz von Foerster, una conferencia sobre “cognición”. Ambos, influenciados por la cibernética, habían llegado al mismo concepto simultáneamente y de forma independiente.
- 24 Descritos en la obra de Fritjof Capra, *La trama de la vida*, pp. 315 ss.
- 25 Bateson, G. (1979) *Mind and Nature. A Necessary Unity*. Dutton, N. Y., p 29. En castellano: *Espiritu y naturaleza*. Amorrortu editores, Madrid, 2006, p. 110.
- 26 La superveniencia es una relación de dependencia entre propiedades de “nivel superior” y de “nivel inferior”, es decir, un grupo de propiedades x superviene de un grupo de propiedades y, cuando las propiedades del grupo x están determinadas por las propiedades del grupo y.
- 27 Frase enunciada por el matemático, ingeniero y fundador de la semántica no aristotélica, Alfred Korzybski.
- 28 Mientras que la velocidad de locomoción del *Physarum polycephalum* es de 1cm/h, el transporte de material intracelular en los tubos que se generan con mayor espesor aumenta hasta alcanzar una velocidad máxima de 1mm/s.
- 29 “Todo cuanto significa vida está ligado al protoplasma” (Uexküll 1930/1944), Uexküll, J. von (1930), *Die Lebenslehre*. Potsdam: Müller und Kiepenheuer Verlag, und Zürich: Orell Füssli Verlag. En castellano: *Teoría de la vida*, Editorial Svmma, Madrid, 1944.
- 30 Estableciendo por eso una relación entre la “enación autopoietica”, en tanto, que es la representación o performance del organismo y, a su vez la “emergencia” del mundo a partir de un trasfondo de comprensión a través de “círculos funcionales” cognitivos y de retroalimentación en “conformidad a un plan”, y la “subjectualidad o sujetidad” (*subjectness*) de Jesper Hoffmeyer (Hoffmeyer, J. [1998], “Surfaces inside surfaces. On the origin of agency and life,” *Cybernetics and Human Knowing* 5 (1), pp. 33–42), en la que la acción con la que el sujeto crea un mundo propio permite al mismo tiempo su autocreación. De este modo se evita la connotación solipsista que tiene la subjetividad, y legitima la fundamentación fenomenológica de la vida del agente. Castro, O., opus cit., pp. 217 y ss.
- 31 Definición transdisciplinar del concepto de *Umwelt* de Jakob von Uexküll, producido por la suma de todos los círculos funcionales del sujeto en actividad en tiempo presente, según las estructuras morfológicas (*Bauplan*) de cada sujeto, conformadas según el plan (*Planmäßigkeit*) constructivo de autorganización. Castro, O., opus cit., p. 146.
- 32 Bateson, G., opus cit., pp. 55-56, 132 y 144.
- 33 Recientemente se ha sugerido que las bacterias también poseen memoria epigenética del pasado, que permite realizar un seguimiento de cómo se manejan encuentros previos con antibióticos. Aprender de experiencias de las bacterias y así poder hacer frente mejor a un segundo encuentro con el mismo antibiótico como se refleja por el hecho de que la colonia se expande

- más rápidamente y adquiere un patrón más complejo. Este efecto puede ser borrado por el crecimiento en condiciones neutras. Una posibilidad es que este efecto esté relacionado con un cambio genético de la población. Otra posibilidad implica una herencia epigenética al nivel del genoma (Ben-Jacob, Becker, Shapira y Levine 2004; Ben-Jacob, Shapira y Tauber 2006).
- 34 Los efectos beneficiosos de la serina-treonina quinasa es la regulación de la supervivencia celular, fosforilando las proteínas pro-apopticas inhibiendo su actividad. También participa en fenómenos de neuroprotección por factores tróficos, contra la degeneración de las intraneuronas y de las neuronas de proyección estriatales, y en la diferenciación neuronal. La serina-treonina quinasa AKT, conocida como proteína quinasa C (PKC) contribuye a diferentes funciones celulares, incluyendo el metabolismo de nutrientes y la regulación de la transcripción, aparte de ser considerada como el regulador esencial de la proliferación y la supervivencia celular. Su disfunción o mutación contribuye a la apoptosis neuronal y celular, en la enfermedad de Huntington y de Alzheimer.
- 35 El inhibidor de fosfodiesterasa tipo 1 (PDE1), se ha demostrado efectivo para facilitar la potenciación de largo plazo, mejorar la dinámica estructural de las espinas dendríticas, mejorar la recuperación de la memoria, y mejorar el desempeño en pruebas cognitivas en los seres humanos. Aunque estos estudios demostraron la eficacia de la vinpocetina en la mejora de la plasticidad en los sujetos normales, poco se sabe acerca de la efectividad de los inhibidores de PDE para mejorar la plasticidad en los casos de deterioro cognitivo grave.
- 36 En el caso de inhibidores de fosfodiesterasa, tenemos la HAMP dominio (histidina quinasa, guanilato ciclasa, proteínas de metilo vinculante, fosfatasas) y la DHKA como modelos de sistema de dos componentes de transducción de señales que son inhibidores de fosfodiesterasa.
- 37 El moho mucilaginoso *Dictyostelium discoideum* contiene al menos 11 histidina kinasa "HK" (DOKA, DHKA -D y ESTs) que participan en una serie de actividades que incluyen la respuesta osmótica y el desarrollo. Una de ellas es un HK híbrido DHKA de factor importante en la osmorregulación, fosforilando el Regulador de Respuesta RegA, causando la inhibición de la actividad de la fosfodiesterasa AMPc-dependiente de RegA, y aumentando los niveles de AMPc, que a su vez, regulan la actividad de la proteína quinasa A.
- 38 Cuanto mayor sea su dispersión de la luz, mayor es la distancia desde la cual las células se reúnen. (Albrecht-Buehler, G., Zand, M. S., 1989; Albrecht-Buehler, G., 1998, 1992)
- 39 <http://www.basic.northwestern.edu/g-buehler/contents.htm#cont5>
- 40 Bateson, G., opus cit., p. 111.
- 41 Las "equivalencias homeomórficas" se dan cuando existen conceptos que, aún teniendo diferencias en cuanto a formas, atributos, o funciones aplicadas en entornos diferenciados, toman ciertas semejanzas semánticas o equivalencias, de tipo funcional o morfológico, que conllevan a un enlace significativo entre sí. Castro, O., opus cit., p. 191.
- 42 En la definición ofrecida por Stanley Smith Stevens (Stevens 1957) se trata de la magnitud de la sensación subjetiva provocada por un estímulo. Estimo conveniente remplazar la subjetividad por el criterio de "subjectness" o "subjetualidad" de Jesper Hoffmeyer tratado anteriormente.
- 43 Gustav Theodor Fechner (1801–1887) expuso en 1860 en sus "Elemente der Psychophysik" las ideas conectivas entre la materia y la psique, desarrolladas

- en su mente desde 1850. Comprendió que debía medir (obsesión existencialista de Lord Kelvin), a través de un aumento relativo de energía corporal, el correspondiente aumento de intensidad mental (Boring, E. 1956). Como los trabajos fueron comprobaciones de las teorías efectuadas en 1825 y 1834 por Ernst Heinrich Weber (1795–1878) para el estudio de mediciones de pérdida de audición conductiva y también sobre el tacto, editado en “Die Lehre vom Tastsinn und Gemeingefühl” en 1946, Fechner quiso mantener con el nombre de “ley de Weber” aunque el propio Weber no la formuló nunca, ampliándolo también a la detección de pesos.
- 44 Los trabajos de Pfeffer sobre la Ley de Weber-Fecher en la quimiotaxis bacteriana queda verificado por C. Weibul en su trabajo *In Bacteria*, vol, 1, I. C. Gunsalus & R. Y. Stanier, eds., pp. 153. Pero donde queda verdaderamente demostrado es en Keller, E. F., Segel, L. A. (1971), “Traveling bands of Chemotactic Bacteria: a theoretical análisis”, *Journal of Theoretical Biology* 30, pp. 235-248.
- 45 “Los ‘qualia’ humanos son la amplificación geométrica de una irritabilidad unicelular que aún no comprendemos bien (...) Sobre su origen unicelular es poco lo que puede decirse hoy por hoy, pero esta ignorancia no es una razón definitiva para pensar que son fenómenos inexplicables científicamente porque tenemos evidencia contundente de que los qualia están atados a la actividad electromagnética del cerebro y de que son ‘solubles en anestesia’”. Llinás, R. R. (2001), *I of the Vortex, From Neurons to Self*, MIT Press.
- 46 Hemos dejado la fitosemiótica para un desarrollo más concreto en preparación.
- 47 Criterios cognitivos que hemos visto anteriormente, según Pamela Lyon.
- 48 Desarrollo estudiado por Atsuko Takamatsu en los plasmodios *Physarum polyccephalum* donde la geometría morfológica en red permite la adaptación al entorno hostil y la emergencia de funciones biológicas provocan el principio mínimo de “mobiligence”. Dicha “mobiligence” puede definirse como la inteligencia de la generación de la función motora adaptativa que emerge por la movilidad, y el enfoque para entender los mecanismos que generan las conductas adaptativas. Hajime Asama, *Introduction of the Mobiligence Program*. University of Tokyo. In: 2005 - 2009 Annual Report “Emergence of Adaptive Motor Function through Interaction among the Body, Brain and Environment—A Constructive Approach to the Understanding of Mobiligence”, pp. 7-12.
- 49 De ese modo, los módulos más pequeños se autoestabilizan más fácilmente, creando así nódulos locales, semejantes a un tendón de Aquiles. De ese modo, la división en subsistemas conforma una estructura jerárquica en el citoesqueleto que recuerda que, en la jerarquización compleja en organismos vivos superiores, la tensegridad subyace en la estabilidad morfológica ósea y muscular (Ingberg, D. E., 2003).
- 50 Cumsky, M. G., Zusman, D. (1979), “Myxobacterial hemagglutinin: A development-specific lectin of *Myxococcus Xanthus*,” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 76 (11): 5505-5509.
- 51 Cornillon, S., et al. (2008), “Involvement of Sib Proteins in the Regulation of Cellular Adhesion in *Dictyostelium discoideum*,” *Eukariotic Cell* 7 (9): 1600-1605.
- 52 Nagano, Y., et al. (1992) “Yolk Vitronectin,” *The Journal of Biological Chemistry* 267 (34): 24863-24870.
- Miyazaki, K., Hayashi, M. (1992), “Physarum vitronectin-like protein: An

- Arg-Gly-Asp-dependent cell-spreading protein with a distinct NH₂-terminal séquense," *Experimental Cell Research* 199 (2): 106-110.
- 53 Uexküll utiliza el término "*tonus*" a la estimulación que se envía a los órganos efectores desde el *Innenwelt*. "*Tonusthaltheorem*" explica que el tiempo y la capacidad interactiva del operador que asocia a cada sistema vivo su *Umwelt* viene ofrecida como flujos.

BIBLIOGRAFÍA

- Albrecht-Buehler, G. (1981), "Does the geometric design of centrosomes imply their function," *Cell Motility*, 1, pp. 237-245.
- Albrecht-Buehler, G. (1992), "Rudimentary form of cellular 'vision' ", *PNAS* 89, 8288-8292.
- Albrecht-Buehler, G. (1998), "Altered drug resistance of microtubules in cells exposed to infrared light pulses: are microtubules the 'nerves' of cells?" *Cell Motility and the Cytoskeleton* 40 (2): 183-192.
- Albrecht-Buehler, G., Zand, M. S. (1998), "Long-term observation of cultured cells by interference-reflection microscopy: near-infrared illumination and y-contrast image processing," *Cell Motility and the Cytoskeleton* 13 (2): 94-103.
- Aravind, L., Pointing, C. P. (1999), "The cytoplasmic helical linker domain of receptor histidine kinase and methyl-accepting proteins is common to many prokaryotic signalling proteins," *FEMS Microbiology Letters* 176 (1): 111-116.
- Baer, K. E. von (1864), *Reden gehalten in wissenschaftlichen Versammlungen und kleinere Aufsätze vermischten Inhalts*. St. Petersburg Schmitzdorff..
- Ball, P. (2008), "Cellular memory hints at the origins of intelligence," *Nature* 451, p. 385.
- Baluka, S., Mancuso, S. (2009), "Deep evolutionary origins of neurobiology," *Communicative & Integrative Biology* 2 (1): 60-65.
- Baluka, S., Mancuso, S. (2009), "Deep evolutionary origins of neurobiology. Glossary," *Communicative & Integrative Biology* 2 (1): 1-2.
- Barandiaran, X., Di Paolo, E. & Rohde, M. (2009), "Defining agency. Individuality, normativity, asymmetry and spatio-temporality in action," *Journal of Adaptive Behavior*. (Rohde, M. & Ikegami, T. (eds.) Special Issue on Agency.)
- Barends, T. R., et al. (2009), "Structure and mechanism of a bacterial light-regulated cyclic nucleotide phosphodiesterase", *Nature* 459 (7249), pp. 1015-8.
- Bateson, G. (1979), *Mind and Nature. A Necessary Unity*. NY: Dutton. En castellano: *Espíritu y Naturaleza*. Amorrortu editores, Madrid, 2006.
- Ben-Jacob, E. (2009), "Learning from bacteria about natural information processing," in *Natural Genetic Engineering and Natural Genome Editing*. Edited by G. Witzany. Annual New York Academy of Sciences 1178, pp 78-90.
- Ben-Jacob, E., Shapira, Y., Tauber, A. I. (2006), "Seeking the foundations of cognition in bacteria. From Schrödinger's negative entropy to latent information," *Physica A*, 359, pp. 495-524.
- Boring, E. (1956), "Gustav Theodor Fechner," en Newman, J. R., *The World of Mathematics*. Vol. 3, NY: Simon & Schuster Inc., pp. 217-234.
- Capra, F. (1996), *The Web of Life*. NY: Anchor Books. En castellano: *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Anagrama. Col. Argumentos. Barcelona, 1998.
- Castro, O. (2009), *Jakob von Uexküll: El concepto de Umwelt y el origen de la biosemiótica*. Trabajo de investigación para la obtención del DEA. Departamento de Filosofía, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Chebanov, S. V. (1999), "Biohermeneutics and hermeneutics of biology," *Semiotica* 127 (1/4), pp. 215-226.
- Cope, F. W. (1976), "Derivation of the Weber-Fechner law and the Loewenstein equation as the steady-state response of an Elovich solid state biological system," *Bulletin of Mathematical Biology* 38 (2), pp. 111-118.
- Copelli, M. (2002), "Physics of psychophysics. Stevens and Weber-Fechner laws are transfer functions of excitable media," *Physics Review E* 65, 060901-1-4.

- Cornillon, S., et al. (2008), "Involvement of sib proteins in the regulation of cellular adhesion in *Dictyostelium discoideum*," *Eukariotic Cell* 7 (9), pp. 1600-1605.
- Cumsky, M. G., Zusman, D. (1979), "Myxobacterial hemagglutinin: A development-specific lectin of *Myxococcus Xanthus*," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 76 (11), pp. 5505-5509
- Cumsky, M. G., Zusman, D. (1981), "Binding properties of myxobacterial hemagglutinin," *The Journal of Biological Chemistry* 256 (23), pp. 12596-12599.
- Eigen, M. (1971), "Molecular self-organization and the early stages of evolution," *Quarterly Reviews of Biophysics* 4, 2&3, pp. 149.
- Florkin, M. (1974), "Concepts of molecular biosemiotics and of molecular evolution," *Comprehensive Biochemistry* 29 A. pp. 1-124.
- Freeman, W. J. (2007), "Indirect biological measures of consciousness from field studies of brains as dynamical systems," *Neural Networks* 20, pp. 1021-1031
- Fuller, R. B. (1975), *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*. New York: MacMillan Publishing Co., Inc.
- García Martínez, J. M. (2007), *Mecanismos intracelulares de supervivencia y muerte neuronal en modelos excitotóxicos y transgénicos de la enfermedad de Huntington*. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. Departamento de Biología Celular y Anatomía Patológica.
- Gregor, T., et al. (2010), "The onset of collective behavior in social amoebae," *Science* 328, 1021-1025.
- Haken, H. (1977), *Synergetics – An Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. Berlin: Springer Verlag.
- Haken, H. (1987), "Synergetics. An approach to self-organization," in Yates. F. E. (ed.) *Self-Organizing Systems. The Emergence of Order*. NY: Plenum Press, pp. 417-434.
- Hämäläinen, R., Saarinen, E. (2004), *Systems Intelligence—Discovering a hidden competence in human action and organizational life*. Systems Analysis Laboratory Research Reports. Helsinki University of Technology.
- Hellingwerf, K. J. (2005), "Bacterial observations: a rudimentary form of intelligence?" *Trends in Microbiology* 13 (4), pp. 152-158.
- Hillen, T., Painter, K. J. (2009), "A user's guide to PDE models for chemotaxis," *Mathematical Biology* 58, pp. 183-217.
- Hoffmeyer, J. (1998), "Surfaces inside surfaces. On the origin of agency and life," *Cybernetics and Human Knowing* 5 (1), pp. 33-42.
- Hoshikawa, H., Saitô, N. (1978), "On the chemical reactions for chemotaxis in bacteria," *Journal of Theoretical Biology* 70, pp. 1-15.
- Ingber, D. E. (1997), "Tensegrity: the architectural basis of cellular mechanotransduction," *Annu. Rev. Physiol.* 59, pp. 575-599.
- Ingber, D. E. (2003), "Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology," *Journal of Cell Science* 116 (7), pp. 1157-1173.
- Jacob, E. B., Becker, I., Shapira, Y., Levine, H. (2004), "Bacterial linguistic communication and social intelligence," *Trends in Microbiology* 12 (8), pp. 366-372.
- Kang, Ch. M., et al. (1996), "Homologous Pairs of Regulatory Proteins Control Activity of *Bacillus subtilis* Transcription Factor σ^B in Response to Environmental Stress," *Journal of Bacteriology* 178 (13), pp. 3846-3853.
- Kant, I. (1786-1790), *Kritik der Urteilskraft*. Berlin und Libau, bey Lagarde und Friederich. LVIII und 477 Seiten. Ejemplar en castellano: *Crítica del juicio*. Espasa Calpe, Col. Austral. (1995), 6ª edición. Traducción: Manuel García Morente.

- Kauffman, S. (1990), "The science of complexity and origins of order," *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 2, pp. 299-322.
- Keller, E. F., Segel, L. A. (1971) "Traveling bands of chemotactic bacteria. A theoretical analysis," *Journal of Theoretical Biology* 30, pp. 235-248.
- Kishimoto, U. (1958a), "Rhythmicity in the protoplasmic streaming of a slime mold, *Physarum polycephalum* I," *The Journal of General Physiology* 41 (6), pp. 1205-1222.
- Kishimoto, U. (1958a), "Rhythmicity in the protoplasmic streaming of a slime mold, *Physarum polycephalum* II," *The Journal of General Physiology* 41 (6), pp. 1223-1244.
- Kitano, H. (ed.) (2001), *Foundations of Systems Biology*, Boston: MIT Press.
- Kobayashi, R., Tero, A., Nakagaki, T. (2006), "Mathematical model for rhythmic protoplasmic movement in the true slime mold," *Journal of Mathematical Biology* 53, pp. 273-286.
- Koshland Jr, D. E. (1980), "Bacterial chemotaxis in relation to neurobiology," *Annual Review of Neuroscience* 3, pp. 43-75.
- Kováč, L. (2006), "Life, chemistry and cognition. Conceiving life as knowledge embodied in sentient chemical systems might provide new insights into the nature of cognition," *European Molecular Biology Organization* vol. 7, n. 6, pp. 562-566.
- Krampen, M (1981), "Phytoposemiotics," *Semiotica* vol. 36 (3/4), pp.187-209.
- Langston, R. F., et al. (2010), "Development of the spatial representation system in the rat," *Science* 328, pp. 1576-1580.
- Lazopoulos, K. A. (2005), "Stability of an elastic cytoskeletal tensegrity model". *International Journal of Solids and Structures*, 42, pp. 3459-3469.
- Lenoir, T. (1980), "Kant, Blumenbach, and vital materialism in German biology," *Isis* 71, pp. 77-108.
- Lenoir, T. (1988), "Kant, Von Baer, and causal-historical thinking in biology," *Poetics Today* vol. 9, n. 1, pp. 103-115.
- Lenoir, T. (1989), *The Strategy of Life: Teleology and Mechanics in Nineteenth-Century German Biology*. Chicago: University of Chicago Press.
- Llinás, R. R (2003), *El cerebro y el mito del yo*. Barcelona: Belacqva Ediciones.
- Llinás, R. R. (2001), *I in the Vortex, From Neurons to Self*. Boston: MIT Press.
- Luisi, P. L. (1998), "About various definitions of life," *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 28, pp. 613-622.
- Luisi, P. L. (2006), *The Emergence of Life: from Chemical Origin to Synthetic Biology*. Cambridge University Press. En castellano: *La vida emergente. De los orígenes químicos a la biología sintética*. Tusquets Ediciones. Barcelona, 2010.
- Luisi, P. L., Bersini, H., Stano, P., Bedau, M. A. (2010), "Philosophical and scientific perspectives on emergence," *Synthese* 173, in press.
- Luisi, P. L., Varela, F. J (1989), "Self-replicating micelles — A chemical version of a minimal autopoietic system," *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 19, pp. 633-643.
- Luisi, P. Luigi, Damiano, L. (2010), "Towards an autopoietic redefinition of life," *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 40, pp. 145-149
- Lyon, P. (2006), "The biogenic approach to cognition", *Cognitive Processing* 7(1): 11-12.
- Matsuno, K. (2008), "Molecular semiotics toward the emergence of life," *Biosemitotics* 1, pp. 131-144.
- Maturana, H. R. (1996), *Was ist Erkennen? Die Welt entsteht im Auge diciembre Betrachtens*. Berlin: Goldmann Verlag.

- Maturana, H. R. (1970), *Biology of Cognition*. Reimpreso en Maturana, H. R., Varela, F. J. (1980) *Autopoiesis: The Organization of the Living*. Dordrecht: Reidel.
- Maturana, H. R. (1995), *La realidad: ¿Objetiva o construida?*, tomo I. Barcelona: Anthropos.
- Maturana, H. R., Varela, F. J. (1994), *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo*. Santiago: Ed. Universitaria.
- Medina, A. E., et al (2006), "Restoration of neuronal plasticity by a phosphodiesterase type 1 inhibitor in a model of fetal alcohol exposure," *The Journal of Neuroscience*, January 18, 2006, 26 (3), pp. 1057-1060.
- Miyake, Y., et al. (1993), "Environment-dependent self organization of positional information field in coupled nonlinear oscillator system," *The IEICE Transactions Fundamentals* E76-A (5), pp. 780-785.
- Miyazaki, K., Hayashi, M. (1992), "Physarum vitronectin-like protein: An Arg-Gly-Asp-dependent cell-spreading protein with a distinct NH₂-terminal sequence," *Experimental Cell Research* 199 (2), pp. 106-110.
- Moreno, A., Umerez, J. (2000), "Downward causation' at the core of living organization," in P. B. Andersen, C. Emmeche, N. O. Finnemann & P. V. Christiansen (eds.) *Downward Causation*, Aarhus: Aarhus University Press, pp. 99-117.
- Müller, B. S., di Primio, F., Lengeler, J. W. (2001), "Contributions of minimal cognition to flexibility," in N. Callaos, W. Badawy & S. Bozinovski (Eds.), *SCI 2001 Proceedings of the 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Volume XV, Industrial Systems: Part II*, by the International Institute of Informatics and Systemics, pp. 93-98.
- Nagano, Y., et al. (1992), "Yolk Vitronectin," *The Journal of Biological Chemistry* 267 (34), pp. 24863-24870.
- Nakagaki, T. (2001), "Smart behavior of true slime mold in a labyrinth," *Research in Microbiology* 152, pp. 767-770.
- Nakagaki, T., Guy, R. (2008), "Intelligent behaviors of amoeboid movement based on complex dynamics of soft matter," *Soft Matter* 4, pp. 57-67.
- Nakagaki, T., Kobayashi, R., Nishiura, Y., Ueda, T. (2004) "Obtaining multiple separate food sources; behavioural intelligence in the *Physarum plasmodium*," *Proc. R. Soc. Lond. B* 271, pp. 2305-2310.
- Nakagaki, T., Kobayashi, R., Tero, A. (2006), "Physarum solver. A biologically inspired method of road-network navigation," *Physica A Statistical Mechanics and its Applications* 363 (1), pp. 115-119.
- Nakagaki, T., Yamada, H. & Hara, M. (2004), Smart network solutions in an amoeboid organism. *Biophys. Chem.* 107, pp. 1-5.
- Nakagaki, T., Yamada, H., Toth, A. (2000), "Maze-solving by an amoeboid-organism," *Nature* 407, pp. 470.
- Nelson, D. R., Cumsy, M. G., Zusman, D. (1981), "Localization of myxobacterial hemagglutinin in the periplasmic space and on the cell surface of *Myxococcus xanthus* during developmental aggregation," *The Journal of Biological Chemistry* 256 (23), pp. 12589-12595.
- Nicolescu, B. (2008), "The idea of levels of reality and its relevance for non-reduction and personhood," Conference Metanexus Institute, Madrid.
- Nikolaev, A. R., et al (2010), "Duration of coherence intervals in electrical brain activity in perceptual organization," *Cerebral Cortex* 20(2), pp. 365-382.
- Norsell, U., Finger, S., Lajonchere, C. (1999), "Cutaneous sensory spots and the 'law of specific nerve energies': history and development of ideas," *Brain Research Bulletin* 48 (5), pp. 457-465.

- Ohta, T., Yoshimura, T. (2005), "Statistical pulse dynamics in a reaction–diffusion system," *Physica D* 205, pp. 189–194.
- Ortiz de Zárate, A. (2000), "Teorías sobre la conciencia en los últimos años," *Revista de historia de la psicología* 21 (2-3), pp. 341-348.
- Palmer, L., Lynch, G. (2010), "A Kantian view of space," *Science* 328, pp. 1487-1488.
- Pattee, H. H. (1973), *Hierarchy Theory*. New York: George Braziller
- Pattee, H. H. (1978), "Biological systems theory: descriptive and constructive complementarity," in G.J. Klir (ed.) *Applied General Systems Research*, New York: Plenum, pp. 511-520.
- Pérez Otero, M. (1994), "Propiedades teleológicas y superveniencia", en *Propiedades lógicas y superveniencia*. Endoxa: Series Filosóficas, Madrid: UNED, pp. 121-145.
- Pfeffer, W. (1884), "Locomotorische Richtungsbewegungen durch chemische Reize," in *Untersuchungen Botanischen aus dem Institut zu Tubingen*. Vol. 1. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann, pp. 363-481.
- Pfeffer, W. (1888), "Über chemotaktische Bewegungen von Bacterien, Flagellaten u. Volvocineen," in *Untersuchungen Botanischen aus dem Institut zu Tubingen*. Vol. 2. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann, pp. 582-661.
- Pfeffer, W. (1906), *The Physiology of Plants. A treatise upon the Metabolism and Sources of Energy in Plants*, vol3. Oxford: Clarendon Press. pp. 213-216; 321-322 y 355.
- Pintos-Peñarada, M. L. (2002), "Aron Gurwitsch: Fenomenología de la percepción y encuentro con Kurt Goldstein," *Phainomenon. Revista de Fenomenología* 14 (2007), 255-277 / para la versión online: *Investigaciones Fenomenológicas*, 6 (2008), 327-355, http://www.uned.es/dpto_fim/invfen/InvFen6/17_mluz.pdf
- Pirentis, A. P., Lazopoulos, K. A. (2009), "On the singularities of a constrained tensegrity-cytoskeleton model under equitriaxial loading," *International Journal of Solids and Structures* 47 (6), pp. 759-767.
- Prigogine, I. (1955/ 1961), *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. New York: Interscience.
- Prigogine, I., Nicolis, G. (1977), *Self-Organization In Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations*, New York: John Wiley and Sons.
- Salthe, S. N. (1985), *Evolving Hierarchical Systems: Their Structure and Representation*. NY: Columbia University Press.
- Salthe, S. N. (2008), "Natural selection in relation to complexity," *Artificial Life* 14: 363–374.
- Sato, M., Wong, T. Z., Allen, R. (1983), "Rheological properties of living cytoplasm. Endoplasm of *Physarum Plasmodium*," *The Journal of Cell Biology* 97, pp. 1089-1097.
- Schauder, S., Bassler, Bonnie L. (2001), "The languages of bacteria," *Genes & Development* 15, pp. 1468-1480.
- Shirakawa, T., Adamatzky, A., Gunji, Y-P., Miyake, Y. (2009), "On simultaneous construction of voronoi diagram and delaunay triangulation by *Physarum polycephalum*," *International Journal of Bifurcation & Chaos in Applied Sciences & Engineering*, 19 (10), pp. 3109-3117.
- Shuster, S. C., et al. (1996), "The hybrid histidine kinase DokA is part of the osmotic response system of *Dictyostelium*," *The EMBO Journal* 15 (15), pp. 3880-3889.

- Skelton, R.E., Sultan, C. (1997), "Controllable tensegrity, a new class of smart structures," *Proceedings of the SPIE 4th Symposium on Smart Structures and Materials* 3039, pp. 166–177.
- Sozinova, O., Jiang, Y., Kaiser, D., Alber, M. (2005), "A three-dimensional model of myxobacterial aggregation by contact-mediated interactions," *PNAS* 102 (32), pp. 11308–11312.
- Stamenovic, D. (2005), "Effects of cytoskeletal prestress on cell rheological behavior," *Acta Biomaterialia* 1, pp. 255–262.
- Stamenovic, D., Fredberg, J. J., Wang, N., Butler, J. P., Ingber, D. E. (1996), "A microstructural approach to cytoskeletal mechanics based on tensegrity," *Journal of Theoretical Biology* 181, pp. 125–136.
- Stevens, S. S. (1957), "On the psychophysical law," *Psychological Review* 64 (3), pp. 153–181.
- Stock, A. M., et al. (2000), "Two-component signal transduction," *Annual Review of Biochemistry* 69, pp. 183–215.
- Stock, J., Levit, M. (2000), "Signal transduction. Hair brains in bacterial chemotaxis," *Current Biology* 10 (1), pp. 11–14.
- Stotz, K., Griffiths, P. E. (2008), "Biohumanities: Rethinking the relationship between biosciences, philosophy and history of science, and society," *Quarterly Review of Biology* 83(1), pp. 37–45.
- Sultan, C., Stamenovic, D., Ingber, D. E. (2004), "A computational tensegrity model predicts dynamic rheological behaviors in living cells," *Annual Biomedical Eng.* 32, pp. 520–30.
- Takamatsu, A., Takaba, E., Takizawa, G. (2009), "Environment-dependent morphology in plasmodium of true slime mold *Physarum polycephalum* and a network grow model," *Journal of Theoretical Biology* 256, pp. 29–44.
- Takamatsu, A., Tanaka, R., Yamada, H., Nakagaki, T., Fujii, T., Endo, I. (2001), "Spatiotemporal symmetry in rings of coupled biological oscillators of *Physarum plasmodial* slime mold," *Physical Review Letters* 87 (7), pp. 078102–1–4.
- Tal, R., et al. (1998), "Three *cdg* operons control cellular turnover of cyclic di-GMP in *Acetobacter xylinum*: genetic organization and occurrence of conserved domains in isoenzymes," *J. Bacteriol.* 180, pp. 4416–4425.
- Tero, A., Takagi, S., Saigusa, T., Ito, K., Bebbler, D. P., Fricker, M. D., Yumiki, K., Kobayashi, R., Nakagaki, T. (2010), "Rules for biologically inspired adaptive network design," *Science* 327, pp. 429–442.
- Thompson, R. F. (1986), "The neurobiology of learning and memory," *Science* 233, nº 4767, pp. 941–947.
- Ueda, M., Kuroiwa, T., Matsunaga, S., Ogihara, S. (1999), "Microtubule-dependent migration of the cell nucleus toward a future leading edge in amoebae *Physarum polycephalum*," *Protoplasma*, 211, pp. 172–182.
- Uexküll J. von (1909), *Umwelt und Innenwelt der Tiere*. Berlin: J. Springer.
- Uexküll, J. v. (1934), *Ideas para una concepción del mundo*. Madrid: Espasa-Calpe. Col. Biblioteca de Ideas del Siglo XX.
- Uexküll, J. v. (1940), *Bedeutungslehre*. Leipzig: Verlag von J.A.Barth. En castellano: *Meditaciones Biológicas. Teoría de la Significación*. Traducción de José M. Sacristán. Madrid: Revista de Occidente, 1942.
- Uexküll, J. von (1907), "Die Umriss einer kommenden Weltanschauung," *Die neue Rundschau* 8, 641–661.
- Uexküll, J. von (1920/28), *Theoretische Biologie*. 1. Aufl. Berlin, Gbr. Paetel/2. gänzl. neu bearb. Aufl. Berlin: J. Springer, 253. (1973) Frankfurt a. M.: Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft, xxiv 378. Traducción en inglés: (1926), *Theoretical*

- Biology* (Transl. by D. L. MacKinnon. International Library of Psychology, Philosophy and Scientific Method). London: Kegan Paul, Trench, Trubner & Co.
- Uexküll, J. von (1930), *Die Lebenslehre*. Potsdam: Müller und Kiepenheuer Verlag, und Zürich: Orell Füssli Verlag. En castellano: *Teoría de la vida*, Madrid: Editorial Svmma, 1944.
- Varela, F. J. (1997), *De cuerpo presente. Las ciencias cognitivas y la experiencia humana*. Barcelona: Editorial Gedisa.
- Varela, F. J. (1992), "Autopoiesis and a biology of intentionality," in McMullin, B. and Murphy, N. (eds.) *Autopoiesis and Perception*, pp. 1-14.
- Varela, F. J.; Maturana H. R.; Uribe, R. (1974), "Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model," *Biosystems* 5, pp. 187-196.
- Vedral, V (2010), *Decoding Reality. The Universe as Quantum Information*, Oxford: Oxford University Press, Oxford. Book review in Werner, E. (2010), "Meaning in a quantum universe," *Science* vol. 329, no. 5992, pp. 629 - 630.
- Weber, A. (2001), "The 'surplus of meaning'. Biosemiotic aspects in Francisco J. Varela's philosophy of cognition," *Cybernetics & Human Knowing* 9 (2), pp. 11-29.
- Weber, A.; Varela, F. J. (2002), "Life after Kant: Natural purposes and the autopoietic foundations of biological individuality," *Phenomenology and the Cognitive Sciences* 1, pp. 97-125.
- Werner, E. (1989), *Distributed Artificial Intelligence*, vol. 2, M. Huhns L. Gasser , Eds. London: Pitman, pp. 3-36.
- Werner, E. (1996), *Applications of Multi-Agent Systems*, J. W. Perram y J.-P. Müller, Eds. Berlin: Springer Verlag, pp. 19-39.
- Wills, T. J., et al. (2010), "Development of the hippocampal cognitive map in preweanling rats," *Science* 328, pp. 1573-1576.
- Witzany, G. (1995), "From the "logic of the molecular syntax" to molecular pragmatism," *Evolution and Cognition* 1, pp 148-168.
- Witzany, G. (2006), *The Logos of the Bios 1. Contributions to the foundation of a three-leveled biosemiotics*, Helsinki. Umweb.
- Witzany, G. (2007b),. "The logos of the Bios 2" *Bio-Communication*. Helsinki. Umweb.
- Witzany, G. (2008a), "Biocommunication of unicellular and multicellular organisms," *Triple C*, 6 (1) pp. 24-53.
- Witzany, G. (2008b), "Biocommunication of bacteria and its evolutionary interrelations to natural genome editing competences of viruses," *Nature Precedings*. 1738.2
- Witzany, G. (ed.) (2007), *Biosemiotics in Transdisciplinary Contexts*. Proceedings of the Gathering in Biosemiotics 6. Helsinki: UMWEB Publications.