

# COMPLEJIDAD Y MEREOLÓGÍA.

UN ESTUDIO FILOSÓFICO

PABLO LÓPEZ MEZO

---

Tutor: Prof. Dr. Antonio Benítez López

Master en Epistemología  
de las Ciencias Naturales y Sociales

Universidad Complutense de Madrid. 2015



1.INTRODUCCIÓN .....	1
2.¿QUÉ ES UN SISTEMA COMPLEJO? .....	3
2.1.Definición previa .....	3
2.2.Propiedades de los sistemas complejos .....	5
2.2.1.El modelo <i>Echo</i> .....	5
2.2.2 Johnson y el <i>feedback</i> .....	8
2.2.3. Holland y los sistemas complejos adaptables .....	12
2.2.4. Bertalanffy y los sistemas abiertos .....	14
2.2.5 Relación entre las diferentes propuestas.....	21
2.3.Temas, disciplinas y problemas de los sistemas complejos .....	22
2.3.1.Redes y no linealidad .....	23
2.3.2.Teoría de la información.....	27
2.3.3.Termodinámica.....	30
2.3.4.Memoria, orden y entropía.....	32
3. MODELOS Y COMPUTACIÓN .....	37
3.1. La noción de modelo.....	38
3.1.1.Un ejemplo de teoría y modelo .....	40
3.2. Más allá de la imitación .....	42
3.3. Formalizar la complejidad .....	44
3.3.1. Hiperestructuras.....	44
3.3.2. Ontología formal .....	48
4.EL PAPEL DE LA MERELOGÍA .....	52
4.1. Husserl y la tercera investigación lógica .....	53
4.1.1. Los conceptos fundamentales .....	54
4.1.2. Los seis teoremas .....	58
4.2. Vuelta a los sistemas complejos.....	58
5.CONCLUSIONES .....	65
6.APÉNDICE: ESQUEMAS Y FIGURAS.....	67
6.1. Figura 2.2.1.....	67
6.2. Figura 2.2.4.....	67
6.3. Figura 2.3.1.....	67
6.4. Esquema 2.2.5.....	68
7.BIBLIOGRAFÍA.....	69



## 1. INTRODUCCIÓN

### Planteamiento del problema:

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio de la complejidad. Tras este multívoco concepto, muy utilizado desde hace algunos años, se esconden al menos tres aspectos. El primero es un nuevo enfoque, el cual podría caracterizarse de una forma muy general, por oposición a la actitud analítica, como aquél que trata de centrarse en el estudio de las relaciones entre los elementos de un sistema o todo, y no solamente en los elementos aislados. El segundo aspecto es el nuevo campo de investigación –que parece existir, pese a las dificultades para delimitarlo– fundado por esta perspectiva de carácter holista. Por último, están los problemas que han hecho que este tipo de enfoque aflore a lo largo de los años, problemas que en cierto sentido legitiman la existencia del campo de la complejidad.

Estos problemas son los que surgen al tratar con preguntas del siguiente tipo: “¿cómo es posible que un sistema tenga propiedades que sus partes no tienen?”, “¿por qué un sistema que no tiene ningún control central parece tan organizado?” Éstas y otras cuestiones son las que dan lugar a conceptos como el de emergencia, autoorganización, no linealidad, autopoiesis, etc. El estudio de los fenómenos designados por estos conceptos es lo que constituye el núcleo de lo que se ha llamado “ciencias de la complejidad”.

Algunos de estos conceptos no son nuevos, aunque sí lo es la manera de abordarlos. Uno de los ejemplos más importantes de este nuevo tipo de planteamiento lo constituye el que surge de los problemas entre la termodinámica y la teoría de la evolución, disciplinas relativamente antiguas cuya interacción ha dado lugar a una de las semillas de la complejidad. Mientras que la termodinámica describe una flecha del tiempo cuyo avance supone dirigirse hacia el reposo y el equilibrio (muerte), para la teoría de la evolución el tiempo supone lo contrario: creación y diversidad (vida). El trabajo de Prigogine sobre la termodinámica del no equilibrio constituye una síntesis de las dos tendencias: la complejidad se sitúa en el punto en el que la vida se impone a la entropía. (Maldonado y Gómez<sup>1</sup>, 17-9)

Las ciencias de la complejidad no constituyen, por tanto, un conjunto de ciencias nuevas, sino una manera distinta de aplicarlas, basándose en nuevos conceptos y bajo una óptica diferente a la que se venía utilizando. Por ello se puede encontrar en la bibliografía dedicada a estos temas propuestas desde las matemáticas, la química, la biología, la computación, la física, la filosofía... Y es por esto por lo que la mayoría de los autores que tratan sobre sistemas complejos hace hincapié

en el tema de la interdisciplinariedad: la complejidad también constituye un lugar común en el que especialistas de varios campos colaboran.

En 1978 se creó el Center for Studies of Nonlinear Dynamics en el Instituto La Jolla. En 1980 se creó el Center for Nonlinear Studies en el Laboratorio Nacional de los Alamos. En 1981 fue creado el Institute for Nonlinear Science en la Universidad de California en S. Diego. En 1984 se fundó el Instituto de Santa Fe, cuya finalidad es “to discover, comprehend, and communicate the common fundamental principles in complex physical, computational, biological, and social systems that underlie many of the most profound problems facing science and society today” desde la perspectiva de que “complex problems require novel ideas that result from thinking about non-equilibrium and highly connected complex adaptive systems. We are dedicated to developing advanced concepts and methods for these problems, and pursuing solutions at the interfaces between fields through wide-ranging collaborations, conversations, and educational programs”<sup>1</sup>.

#### Desarrollo de este estudio:

Para llevar a cabo este estudio sobre la complejidad, el trabajo se dividirá en dos partes principales:

La primera de ellas consistirá en un análisis conceptual. A través del examen de las propuestas de varios autores, se tratará de aclarar qué se entiende por complejidad y sistema complejo en la literatura. De esta manera se pretende acotar el tema de estudio, así como tratar de descubrir el pensamiento que subyace a la complejidad. Asimismo, se expondrán algunos de los conceptos más importantes de las disciplinas científicas relacionadas con la complejidad.

Un análisis de este tipo se considera una tarea lícita para la filosofía (Heylighen et al., 2). Sin embargo, puede surgir la duda sobre si el papel de la filosofía termina aquí, o acaso tiene alguna herramienta en su mano que le permita ir más allá.

Debido a esto, en la segunda parte del trabajo se hará uso de la mereología, y ello con un doble propósito. Primero, para tratar de ver el alcance del análisis filosófico en el campo de la complejidad. Segundo, para examinar si los frutos de este análisis pueden ser puestos en conexión con algunas de las disciplinas que estén directamente relacionadas con la investigación en complejidad, tratando de favorecer así las relaciones interdisciplinarias.

En definitiva, los objetivos principales a los que se enfrenta el trabajo son:

---

<sup>1</sup><http://www.santafe.edu/about/mission-and-vision/>

1. Definir qué es un sistema complejo
2. Estudiar el papel que puede tener la filosofía en general, y la mereología en particular, respecto del campo de la complejidad, incluyendo los siguientes temas:
  - a) formalización de los sistemas
  - b) criterios de demarcación de la complejidad
  - c) posibles investigaciones

## 2. ¿QUÉ ES UN SISTEMA COMPLEJO?

### 2.1. Definición previa

En la literatura acerca de sistemas complejos podemos encontrar una gran variedad de formulaciones que tratan de expresar qué sean dichos sistemas. Generalizando, se podría decir que, aunque estas definiciones suelen diferir en su forma, todas hacen referencia a una serie de rasgos comunes. A continuación se presentarán algunos ejemplos provenientes de los autores que se utilizarán como material central en este escrito. La razón de la elección de estos autores estriba en la visión general que aportan acerca de la complejidad, haciendo en cierta manera un recorrido por los principales temas y disciplinas involucrados, visión muy conveniente para un trabajo de carácter introductorio.

John Holland, en una primera y breve aproximación, caracteriza su noción de sistemas complejos adaptables (SCA) así:

“sistemas compuestos por agentes interactuantes descritos en términos de reglas. Estos agentes se adaptan cambiando sus reglas cuando acumulan experiencias.” (Holland, 25)

Por su parte, Melanie Mitchell ofrece dos definiciones alternativas que podrían ayudarnos a entender de una forma general de qué se habla cuando se alude a los sistemas complejos:

1. “a system in which large networks of components with no central control and simple rules of operation give rise to complex collective behavior, sophisticated information processing, and adaptation via learning or evolution.” (Mitchell, 13)
2. “a system that exhibits nontrivial emergent and self-organizing behaviors.” (Íbid.)

Neil Johnson, en su libro “Simply complexity”, ofrece una definición similar a las anteriores:

“Complexity Science can be seen as the study of the phenomena which emerge from a collection of interacting objects” (Johnson, 3-4)

Von Bertalanffy, aunque pertenezca a una estela de pensamiento algo distinta a la de los autores arriba citados, también puede enmarcarse en el estudio de este tipo de fenómenos, los cuales engloba bajo el rótulo de "sistemas":

"Un sistema puede ser definido como un complejo de elementos interactuantes. Interacción significa que elementos,  $p$ , están en relaciones,  $R$ , de suerte que el comportamiento de un elemento  $p$  en  $R$  es diferente de su comportamiento en otra relación  $R'$ . Si los comportamientos en  $R$  y  $R'$  no difieren, no hay interacción, y los elementos se comportan independientemente con respecto a las relaciones  $R$  y  $R'$ ." (Bertalanffy, 56)

Es decir, que en un sistema los elementos se relacionan entre sí de tal manera que su comportamiento difiere de aquél que exhibían en solitario o bien en otras relaciones.

Se puede observar en estas definiciones un claro aire de familia, cuyos rasgos compartidos son: interacción, adaptación, reglas, emergencia, falta de control central y comportamiento grupal. Estos rasgos se relacionan entre sí de varias maneras y, como se verá más adelante, incluso pueden reducirse a algunas propiedades y principios básicos. Algunos de los autores inciden más en unas características debido a su particular enfoque, pero esta situación no resultará un impedimento demasiado grande a la hora de realizar una breve síntesis inicial con el ánimo de condensar los temas generales que se presentarán recurrentemente; simplemente se hará necesario realizar algunas precisiones. Se puede extraer entonces la siguiente definición provisional, a falta de profundizar más en cada uno de los rasgos enunciados:

Un sistema complejo<sup>2</sup> consiste en una variedad de elementos (muchas veces llamados agentes) que interactúan entre sí siguiendo un conjunto de reglas sencillas. De dicha interacción se dice que emergen nuevos patrones de conducta, los cuales no se daban en los elementos aislados y son, en principio, irreducibles a aquel conjunto de reglas simples.

A esta definición se le pueden añadir varias precisiones:

1. La mayoría de autores suele hacer hincapié en que todo esto sucede sin ningún control central, es decir, que no sólo los nuevos comportamientos no son reducibles a las reglas simples iniciales, sino que no es necesario más que dichas reglas para que éstos aparezcan.

---

<sup>2</sup> Una de las definiciones de "sistema" que acepta la R.A.E. es "Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto." "Complejo" lo define principalmente como "compuesto" o "complicado". En este trabajo, "complejo" y "complicado" no se tomarán como equivalentes, pues resulta habitual en la literatura distinguir entre ambos aspectos: algo puede ser complicado sin ser complejo. Complicado se interpretará más bien como "enmarañado" o "difícil", pero que no necesariamente posee los atributos que se estudiarán a lo largo de la exposición que sigue.

Este fenómeno también se suele denominar autoorganización o autorregulación.

2. También se suele decir que los sistemas complejos, o al menos algunos de ellos, son adaptativos (o adaptables). Esto hace referencia al hecho de que los sistemas sean capaces de modificar las reglas por las que se rigen, dando lugar a una mayor tasa de “supervivencia”.
3. Algunos teóricos sostienen que las “propiedades emergentes” o “conductas emergentes” sí son reducibles realmente a las reglas o propiedades primitivas del sistema, pero sucede que en la mayoría de los casos, o quizá en todos, esta tarea de reducción es imposible bien por desconocimiento o bien por falta de medios (potencia intelectual, tiempo, etc.). Este tipo de emergencia podría ser denominada “débil”. Otros, por el contrario, asumen que al menos algunas propiedades emergentes sí son irreducibles a las propiedades/reglas/comportamientos de los componentes simples del sistema. Ésta es la emergencia “fuerte”.<sup>3</sup>

Enumeraciones de características similares pueden verse en (Maldonado y Gómez<sup>1</sup>, 47) y (Ladyman et al., 4-9).

## 2.2. Propiedades de los sistemas complejos

Una vez introducidos los temas que con más frecuencia aparecen en la bibliografía acerca de complejidad, resulta conveniente profundizar en ellos, con el objetivo de comprender su funcionamiento, origen y principios, así como los distintos problemas que puedan suscitar. Mitchell (pp. 12-13) propone una lista que puede hacer las veces de guía dentro del laberinto de distintas propuestas que pueblan el mundo de las llamadas ciencias de la complejidad:

1. Comportamiento colectivo: los agentes, siguiendo reglas simples, logran un comportamiento complejo sin necesidad de control central.
2. Procesamiento de señales e información: los agentes producen y usan información proveniente tanto de sus medios externos como internos.
3. Adaptación: los agentes cambian su comportamiento para incrementar sus posibilidades de supervivencia.

### 2.2.1. El modelo *Echo*

El modelo *Echo* propuesto por Holland en su libro “Orden oculto” proporciona una excelente base para definir formalmente estos fenómenos. Este modelo consta básicamente de tres

---

<sup>3</sup> La distinción entre emergencia fuerte y débil proviene de Chalmers, pp. 244 y ss.

elementos: una variedad agentes, una geografía y un sistema de interacciones. La exposición que sigue estará casi exclusivamente centrada en la descripción de los agentes, debido al especial interés que poseen algunas de las nociones de Holland a este respecto para la formalización de los conceptos que se utilizarán a lo largo de este trabajo (agentes, reglas, adaptación, etc.). En la definición de los agentes interviene el sistema de desempeño, la asignación de crédito y la adaptación.

El **sistema de desempeño** (Holland, 58-68) es el conjunto de reglas que describen el comportamiento de los agentes. Las reglas son, en su mayoría, expresiones teóricas utilizadas, por quien estudia el sistema, para definir el comportamiento del mismo. Es decir, que las reglas mediante las que se describe, por ejemplo, el movimiento en zig-zag de una cucaracha, no existen de manera explícita en este animal, sino que son más bien producto de la interacción entre las partes de la cucaracha. Estas reglas están codificadas siguiendo una sintaxis de estructura condicional: “Si se recibe un mensaje (M), entonces se lleva a cabo una acción (A)”. Una regla de este tipo está compuesta por dos subreglas simples:

1. si los detectores reciben un mensaje válido (M), entonces envían un determinado mensaje ( $M_1$ ) a los efectores
2. si los efectores reciben un mensaje ( $M_1$ ), entonces producen una determinada respuesta (A)

Que el mensaje tiene que ser válido quiere decir que no cualquier mensaje producirá una respuesta. Por ejemplo, el ojo sólo reacciona ante determinadas radiaciones, de modo que solamente un rango determinado de ondas desencadenará el fenómeno que denominamos visión. De la misma manera, un agente reaccionará ante un tipo de mensajes pero no ante otro. Además, los mensajes válidos no producirán cualquier respuesta por parte de los efectores, sino que cada mensaje o tipo de mensajes producirá una respuesta determinada. Así, el ojo (junto con el complejo sistema cerebral de procesamiento de señales) no reacciona de la misma manera a cualquier frecuencia de radiación, sino que unas longitudes de onda provocarán lo que se llama visión del rojo, otras del amarillo, etc.

De esta manera, las reglas se conciben como una especie de procesadores de información:

“algunas reglas actúan sobre los mensajes originados por el detector procesando información del medio ambiente y otras actúan sobre los mensajes enviados por otras reglas; algunas reglas envían mensajes que actúan sobre el medio ambiente a través de los efectores del agente y otras envían mensajes que activan otras reglas” (Holland, 62) La *figura 2.2.1* ilustra estas relaciones.

Utilizando lo dicho hasta ahora se puede definir un agente como el elemento activo de un sistema. Es activo porque lleva a cabo acciones, desempeña tareas, y no hace esto de cualquier manera, sino que sigue unas reglas. Este tipo de reglas es el que los autores como Mitchell califican de simples, pues son las que “guían” directamente a los agentes. Los comportamientos emergentes serían los que surgen a partir de la acción conjunta de los agentes que siguen estas reglas simples. Por ejemplo, en la síntesis de las proteínas, actúa una multiplicidad de agentes (ribosomas, distintos tipos de ARN, etc.), los cuales llevan a cabo tareas simples (extraer una hebra de ADN, ensamblar las partes de un aminoácido, etc.). El resultado final es una proteína que se libera en el citoplasma para que pueda ir al lugar correspondiente y cumplir su función (Mitchell, 90-3). Este resultado es dependiente de todos los elementos simples que dan lugar a él, y no es reducible a una mera suma o agregado de ellos, pues éstos tienen que relacionarse de una manera determinada para llevar a cabo el proceso de la forma correcta.

La **asignación de crédito** (Holland, 68-75) es un sistema diseñado para asignar un número de puntos a cada regla según su nivel de eficiencia para desempeñar una tarea determinada. Las reglas menos eficientes van perdiendo fuerza con el tiempo, hasta que terminan por desaparecer. Mediante este sistema se pretenden simular los fenómenos de refuerzo.

Esta asignación de crédito actúa en conjunción con la **adaptación por el descubrimiento de la regla** (Holland, 76-95), que es el sistema que permite que el comportamiento del agente cambie a lo largo del tiempo. Durante este proceso, se seleccionan las reglas que han obtenido una mayor puntuación y se “cruzan” dando lugar a “hijos”, que en algunos casos serán más eficientes que los padres. Estas reglas más eficientes serán seleccionadas para un nuevo cruzamiento, y así sucesivamente. Mediante este sistema se puede producir adaptación en el comportamiento de los agentes, es decir, se puede observar cómo éstos varían sus patrones de acción a lo largo del tiempo.

Como se indicó al principio, el modelo *Echo* (Holland, 107-154) hace uso de algunos otros elementos (el etiquetado o marbeteado, que permite a los agentes reconocer la clase a la que pertenecen los demás; acumulación e intercambio de recursos; geografía; etc.) que permiten relacionarse a los agentes entre sí para poder estudiar las dos características básicas de los SCA: 1) la diversidad de agentes actuando en conjunto y 2) la anticipación, es decir, la capacidad que tienen esos agentes para adaptarse guiados por objetivos a largo plazo.

Mediante los conceptos usados en este modelo se podrán definir más firmemente las tres propiedades esenciales de los sistemas complejos enunciadas más arriba:

1. Comportamiento colectivo: los agentes siguen unas reglas, que son patrones de actuación

que pueden ser descritos en una sintaxis. Estas reglas les permiten coordinarse entre sí, sin necesidad de un generador central de reglas.

Resulta muy importante para los sistemas complejos el carecer de control central, pues si lo tuvieran, no serían tales. Esto es debido a que la existencia de un control central haría que el resto de atributos que define la complejidad desapareciera, ya que el comportamiento colectivo no emergería de la interacción entre los agentes, sino que se desprendería o deduciría de los mandatos de la supuesta “sede central” sin necesidad de que interviniera ningún otro elemento.

Un buen ejemplo de sistema en el que sus componentes actúan de forma colectiva sin necesidad de control central sería un hormiguero. Cuando se estudia el forrajeo de las hormigas, se observa que interactúan entre sí combinando únicamente movimientos aleatorios de búsqueda y rastros de feromonas que marcan el lugar en que se ha encontrado el alimento. No existe una “hormiga directora”, pero el resultado de toda la actividad es la manutención del hormiguero en su conjunto (Benítez<sup>1</sup>, 260-3).

2. Procesamiento de señales e información: las propias reglas son los procesadores de información, pues son las encargadas de codificar un estímulo de manera que el agente pueda reaccionar de manera adecuada a él. Se utiliza tanto información exterior (procedente del medio) como interior (procedente de los receptores o detectores).
3. Adaptación: los agentes cambian su estrategia (conjunto de reglas que determina su acción) según las situaciones provocadas por el enfrentamiento entre los objetivos y las exigencias del entorno. En la naturaleza, una regla puede estar ejemplificada en una estrategia, un conjunto de genes, una bacteria con un movimiento reflejo determinado, etc. Los objetivos, por su parte, pueden oscilar entre lo más simple (la mera permanencia en el tiempo<sup>4</sup>) y formas más complejas (resoluciones de problemas matemáticos, gobierno de una población).

### 2.2.2 Johnson y el *feedback*

En (Jonhson, 13-6) encontramos una lista algo rapsódica de los ingredientes que un sistema complejo debe tener (si no todos, muchos de ellos) para considerarse tal:

1. Contiene agentes que interactúan entre sí: se relacionan por cercanía, información, etc.
2. El comportamiento de los agentes está afectado por la memoria o *feedback*: lo que sucede

---

<sup>4</sup> Como objetivo, la permanencia o supervivencia es simple (pues la gran mayoría de los objetivos concebibles lo presuponen en su base), aunque los mecanismos que se desarrollen para lograr su consecución sean complejos.

en el pasado / otro lugar tiene influencia en el presente / otro lugar. Esto puede hacer que el sistema en su conjunto esté afectado por *feedback*

3. Los agentes adaptan sus estrategias
4. El sistema es abierto: el entorno puede influir en él

Estos ingredientes hacen que aparezcan los siguientes comportamientos, propios de los sistemas complejos:

5. El sistema parece estar vivo, evoluciona
6. Tiene fenómenos emergentes no esperados: no reducibles a las propiedades de los agentes
7. Típicamente, la emergencia se da sin ningún control central: un sistema complejo es mayor que la suma de sus partes
8. El sistema muestra un comportamiento en el que se mezclan el orden y el desorden

El hecho de que los agentes interactúen entre sí, adapten sus estrategias, den lugar a propiedades emergentes y lo hagan sin control central, ya ha sido expuesto con anterioridad, pero resultará conveniente centrarse en dos aspectos a los que aún no se ha prestado atención y que tienen relación con todas las demás propiedades de los sistemas complejos: el *feedback* (o retroalimentación o memoria) y la cuestión del orden y el desorden.

“Complex Systems are able to move spontaneously back and forth between ordered behavior such as a traffic jam or a market crash, and the disorder typical of everyday operation, without any external help. In other words, a Complex System can move freely between disorder and order, and back again, and can therefore be said to exhibit “pockets of order”. (Johnson, 20-1) ¿Cómo es posible que suceda esto? ¿Cómo puede un sistema pasar del desorden al orden y viceversa, cuando la tendencia natural de las cosas ordenadas es desordenarse, y de las desordenadas, permanecer así? La clave reside en el feedback (Johnson, 25-6).

El siguiente ejemplo (basado en Johnson, 21-6) ayudará a entender por qué. Imaginemos que hay una oficina con varias estanterías y varios archivos ordenados en ellas. Durante el trabajo, los archivos se suelen sacar para ser consultados, y hay un ayudante encargado de volverlos a ordenar. Sin embargo, este ayudante resulta ser descuidado, de forma que suele mezclarlos, alterando el orden en el que se supone que deberían estar. Si el número de estanterías y archivos es relativamente bajo, este comportamiento no provocará demasiados estragos. Por ejemplo, si sólo hay una estantería y dos archivos (A y B), sólo existen dos posibles ordenaciones: A-B y B-A. Sin

embargo, aun con una sola estantería, pero con diez archivos, el número de posibles ordenaciones se dispara (factorial de 10 =  $10 \times 9 \times 8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 3,628,800$ ). Supongamos que éste es el caso, y que un buen día el jefe le indica a un empleado que debe trabajar sobre estos archivos empezando por el primero, que está colocado a la izquierda de todos los demás, y terminando por el último (a la derecha del resto), pues han sido dispuestos en un orden determinado. Pero resulta que el ayudante descuidado ha tirado todos los archivos al suelo. Después, los ha vuelto a colocar en la estantería, pero aleatoriamente, ya que desconocía el orden original. El problema es que el empleado que debía trabajar sobre esos archivos tampoco lo recuerda. Explorar todas las ordenaciones posibles para tratar de dar con la correcta conllevaría un enorme trabajo (podría durar más de un año si se pretende comer y dormir) y, de todas formas, ¿cómo se garantizaría que se ha dado con el orden original, si éste no se recuerda? La única solución es que el jefe vuelva a transmitir (o recuerde) la información al empleado. Mediante este *feedback* de información, es posible reordenar, con algo de esfuerzo, lo que tan fácilmente se desordenó.

El *feedback* puede presentarse en dos formas: “It can be built into the objects themselves – for example, humans have a memory of the past which can affect their decisions in the present. Or it can be information or influence fed into the system from the outside” (Johnson, 26). Estas dos formas funcionan de la siguiente manera:

1. La información proviene del propio agente: éste actúa y obtiene un resultado; ese resultado queda en la memoria y afectará a las futuras acciones del agente. Dicho de otra manera: los *outputs* pasan, al menos en parte, a formar parte del *input*. Es lo que se conoce más comúnmente como retroalimentación, y es un fenómeno en estrecha relación con el refuerzo. En efecto, la capacidad del agente para “recordar” los resultados de sus acciones es clave para que dichos resultados se evalúen de alguna forma, y por tanto para que la conducta que dio lugar a los resultados favorables sea reforzada.
2. La información viene de fuera: el agente recibe señales de una fuente exterior al sistema y eso condiciona sus futuras acciones.

El esquema subyacente es el mismo: la información cambia el modo de proceder del agente. Normalmente esta información proviene de algún tipo de interacción con el medio.

Como corolario se podría añadir: el *feedback* requiere uso de energía. En el ejemplo de los archivos tenemos un caso del segundo tipo, pues la información acerca del orden correcto proviene de fuera del sistema formado por el empleado que debe ordenar la estantería y la susodicha estantería. Pero además, el trabajo de reordenar los archivos le cuesta cierta cantidad de energía al

empleado. De este modo, la información permite que un sistema pase del desorden al orden, pero no permite violar el segundo principio de la termodinámica (que dice que la entropía, es decir, la cantidad de energía que ya no puede ser convertida en trabajo, siempre crece (ver 2.3.3)). Por tanto, el sistema con *feedback* debe ser abierto al medio en cuanto a información y en cuanto a energía, es decir, debe poder intercambiar con él estos dos elementos (Johnson, 26). El gasto de energía que es necesario para introducir orden en un sistema implica que otro sistema se ha desordenado (pues se le ha quitado energía), de modo que se podría decir que el orden en un lugar conlleva desorden en otro.

El *feedback* se relaciona con el orden, la energía, la información y el carácter abierto de un sistema. Pero, además, tiene mucho que ver con la emergencia. La manera en que se relacionan las partes de un sistema entre sí y con el medio (y el *feedback*, al fin y al cabo, no es sino la relación del sistema con el medio a través de energía e información), hace que este sistema no adquiera cualquier configuración y que no cambie de cualquier manera, sino que provoca que el sistema se decante o sufra tendencia a adquirir ordenaciones específicas:

"The fact that biases in the arrangements of objects can arise as a result of external conditions is very important for our understanding of which emergent phenomena are likely to arise in a given Complex System. This is because such biases directly affect which arrangements arise more frequently, and hence are more likely to be observed. Likewise, such biases can also prevent some arrangements from ever occurring." (Johnson, 33)

Hasta ahora se ha visto cómo un sistema puede ser capaz de pasar del desorden al orden, pero también se ha afirmado que es posible que suceda lo contrario. ¿Cómo?

Para explicarlo, se puede seguir utilizando el ejemplo de la oficina, pero esta vez, en lugar de un ayudante descuidado, tendremos uno sistemático (Johnson, 44-5). Además, habrá varias estanterías (que están numeradas por orden, de 1 a  $n$ ). El maniático ayudante decide utilizar este sistema para decidir la siguiente posición de un archivo:

- Llama  $S$  al valor que resulta de la división del número de estantería en el que se encuentra el archivo entre el número total de estanterías. Por tanto,  $S$  será un número entre 0 y 1.
- Si la posición inicial del fichero se llamaba  $S_1$ , la siguiente se llamará  $S_2$  y así sucesivamente.
- Al parámetro  $r$  le otorga el valor 4
- Para hallar  $S_2$  a partir de  $S_1$  realiza las siguientes operaciones:  $S_2 = r \cdot S_1 \cdot (1 - S_1)$

- Para hallar  $S_3$ , hará lo siguiente:  $S_3 = r \cdot S_2 \cdot (1 - S_2)$ . Al seguir la serie, se ve que la fórmula general es  $S_{n+1} = r \cdot S_n \cdot (1 - S_n)$

Esta fórmula se conoce como ecuación logística (Mitchell, 27) y tiene dos peculiaridades: posee “memoria” (pues cada resultado se obtiene en función del anterior) y devuelve una serie caótica de números cuando los parámetros ( $r$  y  $S_1$ ) se acercan a un cierto valor. Una serie caótica es aquella en la que el periodo es infinito o, dicho con otras palabras, aquella en la que no se repite ningún patrón. Esto provoca que cualquier espectador que vaya observando los cambios de posiciones de los libros dentro de las estanterías perciba dicho movimiento como aleatorio, es decir, que no sea capaz de hallar un patrón de comportamiento.<sup>5</sup>

El último es un ejemplo de cómo un agente, siguiendo una regla simple (un patrón, algo ordenado) puede dar lugar al caos (algo desordenado, aleatorio) (Johnson, 44), de modo que la respuesta acerca de cómo un sistema complejo puede pasar del orden al desorden puede aproximarse así: un agente o conjunto de agentes, siguiendo ciertas reglas, pueden dar lugar a comportamientos impredecibles. De todas maneras, el orden y el desorden han de ser tomados más bien como extremos entre los que un sistema complejo se mueve, y no como estados en los que el sistema queda estancado en un momento determinado. Resulta habitual leer que los sistemas complejos son capaces de moverse entre el orden y el desorden, es decir, que contienen ciertos patrones pero también se da en ellos cierta aleatoriedad y espontaneidad. Esta capacidad les otorga flexibilidad, lo que supone una ventaja adaptativa, pues permite en ellos el cambio, lo que les hace capaces enfrentarse a situaciones novedosas o inesperadas (Johnson, 63-5).

### 2.2.3. Holland y los sistemas complejos adaptables

A través del modelo *Echo* Holland presenta un sistema para recrear y simular los sistemas complejos. Pero su trabajo va más lejos todavía, ya que el papel de dicho modelo no se limita al de ser un mero juego que “imita” la realidad. El objetivo de este modelo también es el de estudiar la realidad, ayudando a organizar los aspectos a observar, aquéllos que ya se observaron y quizá también a descubrir aquéllos que se pasaron por alto. “Orden oculto” tiene como tarea principal estudiar los principios generales de los sistemas adaptables (la coherencia frente a los cambios mediante adaptación y aprendizaje), de forma que las intuiciones que se tienen sobre ellos se

---

<sup>5</sup> El mismo debate que se generaba en torno al tema de la emergencia fuerte y débil puede aparecer al tratar con la noción de comportamiento caótico, pues hay quien argumenta que el patrón es inalcanzable completamente (por ejemplo, Mitchell, 33), pero también hay quien sostiene que sólo lo es en la práctica (por falta de medios, etc.) (Johnson, 47). Es decir, el caos puede ser o causa del sujeto o un fenómeno objetivo.

conviertan en conocimientos más profundos (Holland, 20-1).

Las siete características principales de los SCA las constituyen lo que Holland llama “Los siete básicos” (25-55), y consisten en cuatro propiedades y tres mecanismos. Las cuatro propiedades son la agregación, la no linealidad, los flujos y la diversidad.

La **agregación** (26-9), característica básica de todos los SCA, consiste en la capacidad que tienen los agentes de formar conjuntos organizados jerárquicamente. De esta manera, una multiplicidad de agentes puede formar meta-agentes, que poseen propiedades nuevas y que pueden actuar como agentes independientes (como las redes formadas por neuronas, que a su vez forman hubs de redes, etc.).

La **no linealidad** (31-38) significa que en este tipo de sistemas aparece un comportamiento más complejo que el previsto por los sumatorios de las partes. Tiene mucha relación con el tema de la emergencia.

Los **flujos** (38-42) son los recorridos de información y recursos a través de los nodos y conectores de las redes que forman los agentes entre sí.

La **diversidad** (42-6): existen diferentes clases de agentes y “cada clase de agente llena un nicho, el cual es definido por las interacciones que se centran sobre el agente” (43). Nunca se da un SCA en el que unos pocos tipos muy adaptados acaparen todos los recursos, sino que se crean complejos equilibrios que favorecen la diversidad, debido, por ejemplo, a fenómenos como el reciclaje: los mismos recursos pueden ser utilizados por diversos tipos de agentes en diferentes momentos.

Los tres mecanismos básicos de un SCA son el etiquetado o marbeteado, los modelos internos y los bloques de construcción.

El **marbeteado** (29-30) es el sistema que permite discriminar a los agentes para favorecer la cooperación. “Esto, a su vez, conduce a la emergencia (aparición) de meta-agentes y de organizaciones que persisten incluso si sus componentes están cambiando continuamente. En síntesis, los marbetes son los mecanismos que se encuentran detrás de la organización jerárquica” (30). Por ejemplo, por el olor, un lince puede reconocer al conejo como una presa, y al lobo como un enemigo.

Los **modelos internos** (46-50) son guías de acción construidas mediante selección de información, las cuales permiten a los agentes anticiparse a los acontecimientos. Estos modelos tienen dos características básicas:

- Permiten inferir información acerca del medio del agente
- Determinan activamente la conducta de éste

Lo común es atribuir la posesión de este tipo de modelos a agentes cognitivos del estilo de los mamíferos superiores, pero lo cierto es que muchos otros tipos de agentes pueden hacer uso de ellos. Por ejemplo, una bacteria puede saber orientarse hacia el alimento, pues reacciona ante ciertas sustancias químicas que éste libera a su alrededor. Tenemos una inferencia y un cambio de conducta. Pero resulta evidente que el comportamiento de la bacteria es bien distinto del de un ajedrecista explorando las distintas jugadas que puede llevar a cabo. En este punto Holland introduce la distinción entre modelos internos tácitos y manifiestos. Los modelos tácitos son los que se usan para llevar a cabo predicciones implícitas, como en el caso de la bacteria. Por el contrario, en los modelos manifiestos las distintas posibilidades a explorar se hacen explícitas. Por último, también se dan los modelos externos, como mapas, simulaciones, etc. que sirven para potenciar los modelos internos.

Los **bloques de construcción** (50-55) son elementos simples que se utilizan para construir escenas complejas. La ventaja que suponen es que se pueden reutilizar los mismos bloques para construir escenas diferentes, de forma que se consigue “obtener repetición mientras estamos siendo confrontados con escenas siempre nuevas.” (50) Este mecanismo se hace necesario porque los agentes sólo tienen muestras limitadas de un medio en continuo cambio. Por ejemplo, los distintos rostros humanos están compuestos con un número limitado de rasgos que se repiten en una infinidad de variaciones. O también: alguien no aprende a resolver los infinitos problemas matemáticos que se le puedan presentar, sino que aprende un conjunto de reglas y estrategias que después combina en cada nueva situación.

#### 2.2.4. Bertalanffy y los sistemas abiertos

En su “Teoría general de los sistemas”, Bertalanffy utiliza algunas de las nociones que se han expuesto hasta ahora, como la de apertura del sistema y la de retroalimentación. Sin embargo, debido a su enfoque más inclinado hacia la biología, entiende y utiliza estos conceptos de manera distinta a autores como Johnson, Holland o Mitchell. El estudio de estos conceptos bajo una nueva perspectiva puede ayudar a comprender y completar lo dicho hasta el momento.

De la gran cantidad de temas y problemas que este autor propone, los principales podrían quedar ordenados de esta manera:

##### 1. Autorregulación:

- a) Regulaciones primarias: apertura
  - metabolismo, mecanización, centralización, individuación
- b) Regulaciones secundarias: retroalimentación
- c) Teleología
  - estática
  - dinámica (equifinalidad, intencionalidad, por estructura, por estado final)

## 2. Multiplicidad:

- a) Comportamiento grupal, interacción, información
- b) Emergencia
- c) No linealidad
- d) Jerarquía

Bertalanffy, en la obra citada, no propone ningún orden particular para estos temas, pero quizá el que se acaba de utilizar pueda ayudar a comprender las trabazones que existen entre ellos, no sólo en orden a la exposición de este autor, sino a la comprensión general de los sistemas complejos. La razón es que el esquema presentado sigue un orden de jerarquía ontológica entre los distintos fenómenos, propiedades y comportamientos que componen un sistema complejo. El esquema presentado, si se quiere ir de lo simple a lo complejo, debería leerse de abajo hacia arriba, y está regido por la siguiente lógica:

La primera condición de un sistema complejo es tener partes, ser un compuesto. En otras palabras, si lo simple es lo que carece de partes, lo complejo es lo contrario. Esta condición queda englobada bajo el título genérico de “multiplicidad”. Ella es la que hace posible la aparición del comportamiento grupal y la interacción, puesto que los grupos son de partes y la interacción se da entre ellas. La información se utiliza en la comunicación entre partes (aunque también en la comunicación con el entorno). La emergencia es un fenómeno que aparece, como se ha visto, por la interacción entre agentes (que o bien son partes, o bien tienen partes)<sup>6</sup>; además, los distintos niveles

---

<sup>6</sup> Un agente puede ser considerado una parte si, de forma general, se considera al sistema como un todo (y a los agentes como sus partes). Pero, si se realiza el análisis de cada uno de los agentes, se observará que éstos también poseen partes. Esto es así porque un agente es un objeto que actúa, y no se puede actuar sobre nada, sino sobre un entorno. Además, como se ha visto, posee un sistema de desempeño compuesto de reglas, sensores y efectores (tengan éstos la forma que sea), que es lo que le permite actuar. De este modo, el agente es un sistema formado por reglas, sensores, efectores y entorno. Si se quita uno de estos elementos, ya no se tiene un agente. Un agente simple no puede darse; sería un mero punto sin relación con nada.

de emergencia suelen organizarse de forma jerárquica.

La segunda condición para que un sistema se llame complejo, según coinciden muchos autores, es la autorregulación. Esta segunda condición depende de la primera, pues no parece que pueda autorregularse lo que no tiene partes, ya que este proceso se lleva a cabo principalmente a través del uso de información (retroalimentación) o de energía e información (apertura), lo cual necesita un sistema de procesamiento. Este sistema, o bien está compuesto de agentes o, quizá en algún caso extremo, por un solo agente (que, como se ha indicado, tiene partes necesariamente). Así que la autorregulación necesita partes para darse, y por tanto depende de la multiplicidad. Por último, la teleología se podría considerar como un efecto de los dos tipos de regulaciones (de una de ellas o de ambas): primarias y secundarias.

Estas consideraciones acerca de todos y partes serán examinadas y desarrolladas en el capítulo dedicado a la mereología.

En cuanto a la emergencia, Bertalanffy propone una formulación distinta (basada en ideas de Rapoport y Simon) a las que hasta ahora se han manejado, pero que concuerda con ellas: "Puede ser circunscrito un sistema o «complejidad organizada» [...] merced a la existencia de «interacciones fuertes» [...] o interacciones «no triviales» [...], es decir, no lineales." (Bertalanffy, 18) A diferencia del paradigma analítico, en el que siempre se procuraba que las interacciones entre partes fueran débiles o despreciables, con el fin de estudiar unidades aisladas, la teoría de sistemas, cuya posibilidad defiende Bertalanffy, se centraría en todas aquellas relaciones que no pueden ser reducidas a sus partes componentes. Esto también puede ser expresado mediante la célebre afirmación de que "el todo es más que la suma de sus partes" (Bertalanffy, 55).

Se puede observar que la emergencia mantiene cierta relación con la no linealidad, propiedad matemática que al parecer suele acompañar a la complejidad. Más en concreto, Bertalanffy propone que los sistemas pueden ser descritos mediante conjuntos de ecuaciones diferenciales no lineales (Bertalanffy, 56 y ss.). En un sistema lineal, la suma de dos soluciones también es una solución (lo que se conoce como principio de superposición (Ladyman et al., 4)); en un sistema no lineal, este principio no se cumple (ver sección 2.3.1).

En la definición de sistema dada por Bertalanffy (2.1) se proponía que un sistema era un conjunto de elementos que interactúan, de suerte que se producen comportamientos que no se daban en los elementos aislados. Las relaciones que se establecen entre los elementos pueden ser básicamente de dos tipos (Bertalanffy, 68-9):

1. Dependencia: los cambios en cada elemento provocan cambios en los demás elementos y en el todo
2. Independencia o sumatividad: el cambio de cada elemento sólo depende de sí mismo y sólo le afecta a cada cual

Según esta división (que recuerda a la clásica distinción entre sumas y agregados) las relaciones que se darían dentro de los sistemas son las de dependencia. Si el sistema consistiera en un mero agregado de cosas puestas unas junto a otras, lo más probable es que nada especial surgiera de él. Por eso, no basta con la multiplicidad, sino que para que aparezca la complejidad hace falta multiplicidad organizada.

Estas organizaciones que se forman pueden relacionarse a su vez, y lo habitual es que lo hagan de forma jerarquizada. Para Bertalanffy, la jerarquía es un pilar de la teoría de sistemas, pues está relacionada con varios fenómenos importantes: “la cuestión del orden jerárquico está íntimamente ligada a las de la diferenciación, la evolución y la medición de la organización” (Bertalanffy, 27). Estos fenómenos, como se verá, tienen gran importancia en los sistemas abiertos. Otros autores, como Herbert Simon o Daniel McShea, también otorgan gran importancia a la jerarquía (Mitchell, 109-10).

En lo referente a la autorregulación, la distinción básica que lleva a cabo Bertalanffy es entre regulaciones primarias (base de los sistemas abiertos) y regulaciones secundarias (propias de los sistemas cerrados) (Bertalanffy, 44):

Las regulaciones primarias surgen de la interacción dinámica entre las partes y dan lugar a disposiciones fijas. El paradigma de este tipo de regulaciones podría ser el metabolismo: es un proceso en el que las partes se reemplazan por otras nuevas, mediante intercambios de energía con el medio, pero en el que las estructuras no se pierden, sino que se mantienen o se crean otras nuevas.

Las regulaciones secundarias son aquéllas controladas por disposiciones fijas que, en el caso de los sistemas biológicos, han aparecido a partir de las regulaciones primarias. El caso típico de este género de regulaciones es la retroalimentación, estudiada por la cibernética, en la que la acción se estabiliza porque el funcionamiento del efector está empalmado al receptor (Bertalanffy, 43), o como ya se dijo (1.2.2), parte del *output* pasa al *input*.

Un sistema abierto (abierto al medio en cuanto a energía e información) es aquél que “[s]e mantiene en continua incorporación y eliminación de materia, constituyendo y demoliendo componentes, sin alcanzar, mientras la vida dure, un estado de equilibrio químico y termodinámico,

sino manteniéndose en un estado llamado uniforme” (Bertalanffy, 39). Según la termodinámica, en un sistema cerrado la entropía crece hasta alcanzar un estado máximo, un estado de equilibrio. Los sistemas abiertos, como los organismos vivos, nunca alcanzan tal estado, pues mantienen un continuo intercambio de materia, información y energía con el medio, llevado a cabo una especie de “auto-construcción”. En definitiva, estos sistemas exportan entropía e importan orden.

El hecho de que estos sistemas se mantengan en el llamado estado uniforme es debido a un complejo equilibrio de las velocidades de las reacciones: “Para mantener el «equilibrio dinámico» es necesario que las velocidades de los procesos estén exactamente armonizadas. Sólo así es posible que algunos componentes sean demolidos, liberando así energía utilizable, en tanto que, por otro lado, la importación impide al sistema alcanzar el equilibrio. Las reacciones rápidas, también en el organismo, conducen al equilibrio químico (entre hemoglobina y oxígeno, p. ej.); las reacciones lentas no alcanzan el equilibrio sino que persisten en estado uniforme.” (Bertalanffy, 130)

Este estado uniforme supone un estado improbable, pues consiste en una “lucha” contra la tendencia general de los sistemas a aumentar su entropía (y como tendencia general, constituye el estado más probable), lucha que le lleva al crecimiento del orden (Bertalanffy, 147), pero sin contradecir la termodinámica (150), pues es necesario un gasto energético para mantener el estado uniforme (153).

El crecimiento del orden en los sistemas abiertos lleva parejos otros procesos, que son los que dan lugar a las llamadas disposiciones fijas (Bertalanffy, 70-3):

- Segregación progresiva: la interacción entre ciertas partes disminuye con el tiempo y se forman cadenas causales independientes. Por ejemplo, según evoluciona un embrión, se van diferenciando partes en él
- Esto quiere decir que al aumentar la complejidad el sistema se mecaniza, es decir, que aparecen estructuras fijas especializadas en cierta tarea que operan de forma más independiente
- Debido a este proceso, se tiende a perder regulabilidad, pues resulta extremadamente difícil que cadenas causales con menos relación entre sí cada vez se estabilicen entre ellas
- También tienden a aparecer estructuras centrales. Un centro consiste en un elemento tal que una pequeña variación en sus coeficientes provoca una gran variación en el resto del sistema

Estos procesos, la mecanización y la centralización progresivas, son los que dan lugar a lo que se llama individuo (Bertalanffy, 74), que no sería sino un centro de referencia de los procesos de

intercambio de materia y energía (75).

Los sistemas cerrados son también abiertos en cuanto a la información, pero no en cuanto a la transferencia de entropía, y por ello tienden a alcanzar estabilidad (Bertalanffy, 101). Este tipo de sistemas se basa en estructuras dadas, pues no resulta capaz, como el sistema abierto, de crear las propias estructuras que lo componen. Frente a la espontaneidad que pueden presentar los sistemas abiertos, los cerrados siguen un comportamiento reactivo (basado en el esquema estímulo-respuesta) (170). Según Bertalanffy, son los que han sido estudiados tradicionalmente por la física y, de forma más reciente, por la cibernética (fundada principalmente por Wiener en torno a los años 40). La cibernética se centra en el estudio de los mecanismos de control y regulación, como por ejemplo, un termostato o un misil autoguiado. Este tipo de mecanismos se ciñe al esquema presentado en la *figura 2.2.4*, que aparece en (Bertalanffy, 43).

En este esquema, similar al propuesto para el modelo Echo (*figura 2.2.1*), se puede observar cómo parte de las salidas vuelven a la entrada. Esto es lo que permite a los sistemas cerrados regularse. Por ejemplo, un termostato está programado para mantener una habitación a una temperatura determinada. Para ello, primero mide la temperatura de la habitación, y si supera el límite, hará que disminuya el flujo de calor; hará lo contrario si la temperatura es demasiado baja. Estas maniobras harán que la temperatura de la habitación cambie, temperatura que volverá a ser medida, y así sucesivamente. Este ciclo de regulaciones hará que la temperatura se mantenga en torno al valor estipulado. En el momento en que haya perturbaciones (como cuando alguien entra en la habitación y eleva la temperatura), serán corregidas mediante el mismo mecanismo. Este es el tipo de regulaciones que se consigue cuando las respuestas son a su vez entradas del sistema.

Se ha de hacer la precisión de que entre los sistemas abiertos y los cerrados no existe, como si dijéramos, una relación de contradicción, sino más bien de subordinación. Como se ha descrito, los sistemas abiertos sufren procesos de mecanización, esto es, de formación de estructuras fijas. Estas estructuras fijas, en algunos casos, pueden funcionar como sistemas cerrados, es decir, que tiendan al equilibrio. Por ejemplo, la regulación de la concentración de azúcar en sangre tiene este comportamiento (Bertalanffy, 168). Los sistemas abiertos pueden dar lugar a sistemas cerrados, pero no a la inversa, y por ello, se considera a los primeros como las entidades fundamentales de la teoría de sistemas, y de lo que hoy habitualmente se llamaría complejidad. El error que cometió la cibernética, por tanto, fue el de poner la retroalimentación a la base de todos los sistemas que se autorregulaban (20, 193).

Bertalanffy sostiene que la física, de la misma manera que se había centrado en los sistemas

cerrados y el reduccionismo, también sostenía una visión mecanicista de la naturaleza. Un mecanicismo, seguramente, más sofisticado que el clásico laplaciano, pero que comparte con él un presupuesto básico: la ceguera de los procesos. El concepto de teleología resurge como oposición a esta visión del mundo: “El concepto de mecanismo teleológico, sin importar cómo pueda ser expresado en términos diferentes, puede verse como un intento de escapar de estas viejas formulaciones mecanicistas que hoy resultan inadecuadas, y de presentar nuevas y fecundas concepciones y metodologías más efectivas para estudiar los procesos de autorregulación, los sistemas y organismos con autoorientación y las personalidades que se autodirigen. Así, expresiones como retroalimentación, servomecanismos, sistemas circulares y procesos circulares pueden ser tomadas como expresiones distintas pero en gran medida equivalentes de la misma concepción.” (Bertalanffy, 15)<sup>7</sup>

En efecto, un concepto como el de teleología resulta útil para el estudio de entidades que cambian de estado moviéndose (o al menos pareciendo moverse) hacia una configuración determinada. Este concepto permite formular los cambios de un sistema en función de la distancia que presentan respecto de un estado estacionario, como si dependieran de ese estado futuro (Bertalanffy, 77). Sin embargo, no hay que olvidar que lo que se llama teleología no es sino producto de la causalidad, y que en la realidad, nada puede depender de un estado futuro, pues el futuro aún no se ha dado y no puede ejercer poder causal: “La fórmula «teleológica» de valor final, pues, sólo es una transformación de la ecuación diferencial que indica condiciones actuales. En otras palabras, la dirección del proceso hacia un estado final no es cosa que difiera de la causalidad, sino otra expresión de ella.” (79).<sup>8</sup>

Bertalanffy distingue varios tipos de teleología (80-1):

1. Estática: una disposición parece útil para un propósito. Coincide con el concepto de aptitud. Por ejemplo, el pelo parece apto para dar calor al animal.
2. Dinámica: se distingue de la anterior en que hay directividad, o sea, progresión de sucesos.

---

<sup>7</sup> Citando a Frank, L. K., Hutchinson, G. E., Livingstone, W. K., McCulloch, W. S., y Wiener, N.: «Teleological Mechanisms», *Annals of the New York Academy of Sciences*, 50 (1948).

<sup>8</sup> En general, el uso del concepto de teleología por parte de Bertalanffy parece algo confuso, pues en ocasiones da la impresión de que mezcla la causalidad final con causalidad eficiente, como si la causa final última consistiera en una suerte de causa eficiente que forzara al sistema a llegar a un determinado estado. Pese a estos problemas, puede entenderse que el sentido general de la crítica de Bertalanffy es el siguiente: no hay causas finales "impresas" a priori en la forma de ser de los sistemas, sino que más bien a través de la causalidad eficiente que se da en las interacciones entre las partes del sistema surgen determinados atractores. Y para la descripción de la influencia de estos atractores en el comportamiento del sistema, puede ser útil el concepto de teleología. Bertalanffy habla de los atractores en las funciones que describen los sistemas en (59 y ss.).

Posee varios subtipos:

- a) Dirección de acontecimientos hacia un estado final como si el comportamiento dependiera de ese estado final
- b) Directividad basada en estructura: una disposición estructural dirige el proceso de forma que se logra determinado resultado. Parece que es lo que sucede en sistemas con disposiciones fijas, como los estudiados por la cibernética.
- c) Equifinalidad: consiste en alcanzar el mismo estado final partiendo de diferentes estados iniciales y recorriendo caminos diferentes. Es sumamente importante para la comprensión de los sistemas abiertos y su diferencia con los cerrados: “Los procesos que acontecen en estructuras como de máquina siguen un camino fijo. Así, el estado final cambiará si se alteran las condiciones iniciales o el curso de los procesos. En contraste, puede alcanzarse el mismo estado final, la misma «meta», partiendo de diferentes condiciones iniciales y siguiendo distintos itinerarios en los procesos orgánicos. Son ejemplos el desenvolvimiento de un organismo normal a partir de un cigoto entero, dividido o formado por fusión de dos, o partiendo de pedazos, como en los hidroides y las planadas; o la llegada a un tamaño final definido a partir de distintos tamaños iniciales y después de itinerarios de crecimiento diferentes, etc.” (137-8)
- d) Intencionalidad: la meta futura está presente en el pensamiento del que actúa

#### 2.2.5 Relación entre las diferentes propuestas

El esquema utilizado para la organización de la propuesta de Bertalanffy tenía la peculiaridad de estar guiado por un intento de reducción ontológica de unas propiedades a otras. Es posible que haciendo uso del mismo patrón, puedan quedar englobadas bajo un esquema general las propiedades que se enuncian en las propuestas del resto de autores, lo que podría ayudar a su comprensión, comparación y puesta en relación, con el objetivo de acercarse algo más a una concepción global acerca de qué se entiende por sistema complejo en la literatura.

En el *esquema 2.2.5* se ha convertido cada una de las ramas principales del esquema de Bertalanffy en un apartado temático, que después se relaciona, a través de líneas discontinuas, con las propiedades y los temas propuestos por los demás autores a través de las columnas de la tabla<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup>Además: 1) la multiplicidad se une a la autorregulación por una flecha, pues la primera es condición de la segunda, 2) los sistemas abiertos señalan a los cerrados mediante una flecha curva discontinua, ya que los sistemas abiertos pueden dar lugar a estructuras cerradas y 3) hay una rama llamada “Teleología y adaptación”. Esto último sucede

Como puede observarse, la relación casi siempre es de uno a uno (un tema, una columna), salvo por tres excepciones.

La primera y más llamativa es la dificultad que existe para distinguir, en estos autores, las nociones de sistema abierto y sistema cerrado. Todos suelen hablar de intercambios de información y energía con el medio, así como del carácter abierto de los sistemas, enfrentando incluso el tema de la exportación de entropía; sin embargo, parece que ninguno de ellos aborda el tema a la manera de Bertalanffy, es decir, desde el punto de vista de la autoconstitución del sistema. Es por esto por lo que la primera columna se ensancha hasta abarcar los dos tipos de sistemas. Esta situación puede ser debida al mencionado choque entre la visión de Bertalanffy, más influida por la biología, y la del resto de autores, quizá más inclinada hacia la física. No por ello este tema deja de ser de interés, y será tratado de forma algo más extensa en la sección (2.3.4) con la ayuda del concepto de *autopoiesis*, puesto en circulación por Maturana y Varela.

En lo referente al tema de la autorregulación, también han surgido ciertas fricciones a lo largo de las secciones anteriores, principalmente debido a la noción de retroalimentación usada por Bertalanffy, la cual a veces parece acompañar, y otras contradecir, la noción de memoria o feedback (que puede traducirse como retroalimentación en ocasiones) utilizada por Johnson. De nuevo, esto parece debido a que Johnson no distingue entre regulaciones primarias y secundarias, o entre sistemas abiertos y cerrados en sentido biológico. En la siguiente sección también se tratará acerca de este problema, en orden a esclarecer el concepto de retroalimentación y las relaciones entre los enfoques físico y biológico y las posibles consecuencias que tendrían para una visión general de los sistemas complejos.

Las otras dos peculiaridades conciernen a Holland. En primer lugar, se observa que los modelos internos abarcan todas las ramas relacionadas con la autorregulación, y es que la de modelo interno es una noción compleja relacionada, como se ha visto, con la interacción con el medio, la selección de información, la anticipación y, por tanto, la adaptación. En segundo lugar, aparecen mezclados los conceptos de emergencia y no linealidad. Parece que entre ambos existe cierta relación, la cual tratará de hacerse explícita más adelante (2.3.1).

### 2.3. Temas, disciplinas y problemas de los sistemas complejos

A lo largo de la exposición anterior han ido apareciendo ciertos temas recurrentes, que si bien

---

porque ambos conceptos se consideran hermanados, ya que la teleología proviene de los mecanismos básicos de la autorregulación (necesarios para la adaptación) y se ha considerado la aptitud como un tipo de teleología. Además, ninguno de los autores, al margen de Bertalanffy, suele hablar de teleología.

no constituyen una propiedad como tal, sí pueden ser aspectos que engloben varias de ellas. Asimismo, se ha hecho uso de varios conceptos teóricos que pertenecen a disciplinas o ramas de conocimiento en estrecha conexión con la complejidad. También han surgido algunos problemas debido a la contraposición entre ciertos conceptos y puntos de vista. El tratamiento de estas cuestiones ayudará a dar las pinceladas finales a la visión general de la complejidad que se está tratando de brindar.

### 2.3.1. Redes y no linealidad

Bertalanffy indica (19-20) que la teoría de redes (junto con la de grafos y conjuntos) resulta una herramienta útil en el estudio de los sistemas. Y es que en un campo en el que las conexiones entre las partes son tan importantes como las partes mismas (o quizá más), una disciplina cuyo objetivo resida en el estudio de las propiedades que aparecen según la manera de conectarse de los elementos puede realizar interesantes aportaciones.

De manera general, una red consiste en un conjunto de nodos conectados por enlaces (Mitchell, 234). El grado de un nodo es el número de conexiones que posee. En las redes normalmente aparecen nodos de alto grado llamados centros (*hubs*) (235-6). Por ejemplo, la información en internet tiende a encauzarse a través de portales con un gran número de conexiones hacia otras páginas, como los buscadores. La longitud del recorrido (*path length*) es el número de enlaces que hay en el camino más corto entre dos nodos.

Según el número de conexiones y la distancia que recorren, pueden distinguirse varios tipos de redes. Mitchell (236-9) pone dos ejemplos:

- Redes de mundo pequeño (*small-world networks*): son aquéllas en las que el número de pasos que hay que recorrer para ir de un nodo a otro tiende a ser bajo, es decir, la longitud media de los recorridos (*average path length*) es baja aunque tengan un número pequeño de enlaces de largo recorrido, como puede verse en la *figura 2.3.1*, que aparece en (Mitchell, 237)

El nombre de estas redes proviene del famoso experimento realizado por Stephen Milgram (Mitchell, 227-9; Johnson, 100-1). El experimento consiste en lo siguiente: Milgram escribió varias cartas destinadas a ciertas personas. Estas cartas fueron entregadas a unas personas que no eran los destinatarios, con la intención de que a través de su red de relaciones (alguien que conoce a alguien, que a su vez conoce a otro, etc.) consiguieran hacer llegar las cartas a los destinatarios originales. Milgram comprobó que en muchos de los casos en los que la carta consiguió llegar a su destino, el número necesario de relaciones entre personas (es decir, la longitud del recorrido) fue

igual o menor que seis, dando la impresión de que vivimos en un “mundo pequeño”.

- Redes libres de escala (*scale-free networks*): tienen un pequeño número de centros producto de la interacción de un gran número de elementos sueltos (como en el ejemplo de internet). Además, tienen una gran heterogeneidad, es decir, un amplio rango de grados diferentes. También poseen estructura de mundo pequeño.

Uno de los fenómenos interesantes que sucede en las redes libres de escala (y las que poseen estructura de mundo pequeño en general) es que si son eliminados un conjunto aleatorio de nodos y sus conexiones, las propiedades de la red no cambian; sin embargo, la pérdida de grandes centros si les afecta. Por ejemplo, un accidente en alguno de los grandes aeropuertos del país provocará retrasos y cancelaciones por todo el territorio (Mitchell, 245). Esto quiere decir que este tipo de redes posee alta resistencia a cierto tipo de daños. Este comportamiento puede observarse en la naturaleza: “we know that individual neurons die all the time, but, happily, the brain continues to function as normal. The hubs of the brain are a different story: if a stroke or some other mishap or disease affects, say, the hippocampus (which is a hub for networks encoding short-term memory), the failure can be quite devastating.” (248) Este tipo de sucesos coincide con lo que Bertalanffy expresaba acerca de la centralización: que los centros son aquellos elementos cuyos cambios provocan grandes efectos en el resto del sistema.

Johnson estudia algunos de los comportamientos de las redes de agentes a la hora de la explotación de recursos (108-10). Para ello utiliza las siguientes variables: nivel de recursos, nivel de conectividad y tasa media de éxito. Al contrario de lo que cabría pensar de forma intuitiva, no siempre es más efectivo un mayor número de conexiones. Variando el número de conexiones y la cantidad de recursos se obtienen, a grandes rasgos, los siguientes resultados:

- Si los recursos son bajos y hay conectividad baja, se producen dos fenómenos: una alta disparidad (es decir, la población tiende a polarizarse en dos extremos: exitosos y no exitosos) y baja tasa media de éxito
- Si, por el contrario, la cantidad de recursos es alta, pero se mantiene la baja conectividad, resulta que la tasa de éxito aumenta
- Por último, si la conectividad es alta, independientemente de la cantidad de recursos, se obtiene una baja disparidad y una baja tasa de éxito, es decir, una menor eficiencia general

Este tipo de comportamientos es muy susceptible de ser estudiado mediante el modelo *Echo*, ya que posee todos los ingredientes que dicho modelo implementa desde su misma base:

interacción de agentes, intercambio de recursos y patrones de conducta emergentes (disparidad, éxito, eficiencia, etc.). Estos patrones son los que habitualmente se asocian con la no linealidad; sin embargo, la relación entre estos dos conceptos aún no ha sido aclarada: ¿es lo mismo la emergencia que la no linealidad?, ¿es uno efecto del otro?, ¿es la no linealidad simplemente la expresión matemática de la emergencia?

Mitchell acerca ambos conceptos de la siguiente manera:

“A linear system is one you can understand by understanding its parts individually and then putting them together. When my two sons and I cook together, they like to take turns adding ingredients. Jake puts in two cups of flour. Then Nicky puts in a cup of sugar. The result? Three cups of flour/sugar mix. The whole is equal to the sum of the parts. A nonlinear system is one in which the whole is different from the sum of the parts. Jake puts in two cups of baking soda. Nicky puts in a cup of vinegar. The whole thing explodes. (You can try this at home.) The result? More than three cups of vinegar-and-baking-soda-and-carbon-dioxide fizz. The difference between the two examples is that in the first, the flour and sugar don’t really interact to create something new, whereas in the second, the vinegar and baking soda interact (rather violently) to create a lot of carbon dioxide.” (Mitchell, 23)

Un sistema no lineal es, en general, aquél en el que el todo es mayor que la suma de las partes o, dicho de otra manera, aquél en el que los elementos componentes interactúan, y por tanto no se puede comprender atendiendo a cada elemento o tipo de elementos aisladamente. Un ejemplo de sistema no lineal sería el descrito mediante la ecuación logística en el apartado 2.2.2. Haciendo uso de esta ecuación, se puede explicar el significado de la expresión “el todo es mayor que la suma de las partes”<sup>10</sup>. Tenemos una población de conejos<sup>11</sup> con las siguientes características: tasa de nacimiento = 2, tasa de muerte = 0.4, población inicial = 20 y capacidad máxima de población del entorno (eso es, el límite a partir del cual los individuos mueren por sobrepoblación) = 32. Esta población evoluciona siguiendo la ecuación logística, que adquiere la siguiente forma debido a los parámetros establecidos<sup>12</sup>:  $X_{n+1} = 1,6 \cdot X_n / 32 \cdot (1 - [X_n / 32])$ . El crecimiento (imaginemos que se mide por años) es el siguiente: año 0 = 20; año 1 = 12.

Pero si ahora suponemos que dividimos la población inicial de conejos en dos partes iguales y

---

<sup>10</sup>Ejemplo basado en (Mitchell 26-7).

<sup>11</sup>Una de las aplicaciones de esta ecuación es la predicción de la dinámica del crecimiento de poblaciones.

<sup>12</sup>Las instrucciones necesarias para obtener la ecuación a partir de los parámetros iniciales se explican en (Mitchell, 305). Lo que en el ejemplo de Johnson se llamó  $r$ , y que aquí tiene el valor 1,6, no es sino la tasa de nacimientos menos la tasa de muertes ( $2 - 0,4$ ).

a cada una de ellas la confinamos en una isla, tenemos la siguiente evolución en cada isla: año 0 = 10; año 1 = 11. Si sumamos las poblaciones de cada isla después de un año, obtenemos 22 conejos. Sin embargo, cuando la población inicial no se separó, al año aparecieron 12 conejos. Las sumas no coinciden. Esto es así porque las interacciones entre los conejos, dados los parámetros estipulados al principio, hacen que la evolución de la población sea diferente si las poblaciones iniciales cambian. Es decir, que el todo (la población total de conejos) es diferente a la suma de las partes (la población de conejos en cada isla).

A la luz de lo dicho podría aventurarse una conexión entre los conceptos:

1. Los sistemas complejos son no lineales, o tienen un comportamiento no lineal. Esto quiere decir que si consideramos el sistema como un todo y tomamos de él ciertas partes, el comportamiento de esas partes aisladas diferirá del comportamiento del todo
2. Las propiedades, patrones o conductas emergentes suelen definirse como aquéllas que el todo sí posee, pero las partes no. Son, por tanto, propiedades, patrones o conductas nuevas y no reducibles a las que poseen las partes.
3. Quizá se pueda decir, entonces, que o bien los sistemas no lineales tienen emergencias, o bien que son susceptibles de tenerlas

En el ejemplo de los conejos, realmente no había un comportamiento nuevo en las islas respecto del que existía en la población sin escindir; es decir, los conejos seguían comportándose de la misma forma. Lo que sucedía era que el resultado del comportamiento variaba, debido a que se daba un conjunto diferente de interacciones, ya que el número de individuos era distinto. Si al conjunto de resultados que las ecuaciones van ofreciendo a lo largo del tiempo se le llamara patrón, se podría afirmar que los patrones que aparecían o emergían en ambos casos eran diferentes, y que no eran reducibles entre ellos.

En este caso la emergencia no parece demasiado llamativa, pero si se piensa en un caso más radical, como el del cerebro, la diferencia entre los comportamientos de una neurona y los que lleva a cabo un individuo con capacidades mentales son tan grandes, que se puede llegar a comprender que se haya sostenido que las propiedades mentales pertenecen a un "mundo" diferente. El problema es que describir el cerebro a base de ecuaciones no lineales parece una tarea colosal, aunque se han llevado a cabo algunas investigaciones de ese tipo a menor escala, como las del *C.Elegans*.<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> En (Mitchell, 238) se cita el libro "Neuroanatomy of C. Elegans for Computation", de 1991, en el que se describe el

Debido a la profunda conexión entre no linealidad y emergencia, es seguramente por lo que en (Holland, 21) (y como también se vio en el esquema comparativo) parecen tratarse ambos conceptos como sinónimos.

### 2.3.2. Teoría de la información

Si la teoría de las redes parece resultar útil a la hora de describir las relaciones entre los individuos, la teoría de la información puede hacer lo propio con los individuos que se comunican. Ya se ha visto la importancia de la información en los mecanismos de autorregulación; sin embargo, se han utilizado los conceptos de manera informal, y esto puede hacer que surjan varias dudas: ¿qué es exactamente la información?, ¿cómo se transmite?, ¿qué relación tiene con la materia y la energía, junto a las que actúa en la autorregulación?

La definición de información ideada por Shannon utiliza las nociones de fuente, mensaje y receptor, y podría ser enunciada como *la serie de mensajes que la fuente envía al receptor*. Estos mensajes son seleccionados dentro de un conjunto de mensajes posibles (Mitchell, 52-4). Por ejemplo, una frase de un lenguaje humano es una de las posibles combinaciones de palabras que componen el vocabulario de dicho lenguaje.

Shannon estaba interesado en investigar acerca del aprovechamiento de recursos en sistemas de información, en concreto, en cómo enviar grandes cantidades de información por la red telefónica sin tener que ampliar de forma drástica la capacidad de los canales disponibles. Por ello, la definición dada presenta dos inconvenientes: es muy genérica y no toma en cuenta el significado. Es muy genérica porque “mensaje”, “fuente” y “receptor” pueden ser casi cualquier cosa, de modo que resulta difícil establecer qué es exactamente la información. Y no toma en cuenta el significado debido a que se centra en el envío y procesamiento de señales (por ejemplo, impulsos eléctricos) evitando una excesiva distorsión: las palabras que “viajen” por el cable no importan mientras lleguen bien a su destino, lo cual supone el principal problema.

La ambigüedad en la definición parece inevitable, y si se echa un vistazo a los ejemplos de sistemas complejos que suelen ponerse, se verá que, o bien se utiliza una definición casi para cada caso, o se usa una muy genérica. Hormigas siguiendo feromonas, neuronas recibiendo impulsos, conductores escuchando la radio, el ADN en la síntesis de proteínas, etc. tienen en común la intervención de ciertos elementos que cambian el estado de los agentes (conducta, posición, propiedades...), pero en cada caso estos elementos se instancian en algo que tiene propiedades y

---

mapeo completo de las neuronas de dicho gusano, cuyo comportamiento es descrito a través de programas de ordenador.

modos de funcionar característicos.

El hecho de que no se tome en cuenta la noción de significado (o referencia, o denotación...) realmente puede ser tanto un inconveniente como una ventaja. En contra tiene el peso de la ambigüedad y la incompletitud: ¿cómo puede obviarse algo que se considera tan importante en la comunicación? Pero por otra parte, tratar de definir lo que sea el significado resulta tan difícil como definir la información: puede llevar a una ardua discusión acerca de los tipos, las excepciones, los problemas... De este modo, la incompletitud puede tomarse como una invitación a adoptar la siguiente actitud: se puede postular que se da el suceso de la comunicación, y que el hecho de que los agentes que intervienen cambien su estado denota que el mensaje recibido tenía algo así como significado; qué sea esto en concreto es algo que debe ser discutido en cada caso (en el de las hormigas puede no presentar demasiada complicación en comparación con el de los humanos, claro).

De todas maneras, existen ciertas nociones en la teoría de Shannon que pueden introducirse en parte en la discusión acerca del significado. Es el caso de la llamada "entropía de Shannon" (Ladyman et al., 11), un concepto utilizado para medir formalmente la cantidad de información que una fuente envía. Como a Shannon le interesaba la economía de la capacidad de los canales, observó que normalmente en los mensajes emitidos se dan cadenas de elementos que se repiten, y que éstas podrían ser sustituidas por algún código de menor tamaño, comprimiendo así el tamaño de los mensajes. Por ejemplo, en un texto acerca de jardinería, aparecerán constantemente ciertas palabras (esqueje, semilla, brote, plaga, etc.). Si sustituimos esas palabras por un número (que tenga menos caracteres que la propia palabra, como 1, 2, 3, 4...), veremos que la longitud del texto se reduce.

Esto sucede porque en el lenguaje se repiten patrones y combinaciones. Si el mensaje emitido fuera una combinación caótica de letras, es muy difícil que algún patrón se repitiera, y por tanto el mensaje apenas se podría comprimir. Por otra parte, si el mensaje consistiera en una repetición monótona de símbolos (por ejemplo, "abcd abcd abcd abcd"), sería fácilmente comprimible. Pero en ambos casos, el del caos y el de la monotonía, resulta que la cantidad de información que se puede transmitir tiende a ser nula. En efecto, ¿qué podría comprenderse de un texto compuesto aporreando el teclado del ordenador?, ¿y de uno que se creó manteniendo siempre la misma tecla pulsada, o repitiendo la palabra "casa"? Cuando la combinación de caracteres (o pulsos eléctricos, o señales de humo...) es aleatoria, se dice que la entropía (de Shannon) de ese mensaje es alta; cuando la combinación es muy ordenada, se dice que la entropía es baja. Cuando la entropía resulta ser alta

o baja, la cantidad de información que se transmite es poca, de lo que resulta que la información, como la complejidad, se mueve entre el orden y el desorden: sigue ciertos patrones pero también posee flexibilidad. Por ejemplo, el lenguaje humano posee una gramática (reglas) que establecen cómo se pueden combinar y flexionar los diferentes tipos de palabras, es decir, que estipulan qué combinaciones poseen sentido. Siguiendo estas reglas se pueden crear enormes cantidades de combinaciones lícitas. Es en esta medida en la que la teoría de Shannon puede enfocarse hacia la discusión lingüística, como “medida del sentido y el sinsentido”. Sin embargo, al no tomarse en cuenta la intención y la referencia, es difícil que esta medida lo sea del significado en general.

De todas maneras, algo ha quedado establecido: la transmisión de información sigue ciertas reglas, y eso es lo que hace que aparezcan en ella patrones. Y se podría añadir que para que se dé la comunicación, tanto el receptor como el emisor deben conocer dichas reglas. Si el receptor desconociera las reglas, no podría procesar y utilizar la información, no cambiaría su estado. Esto se mencionó en (2.2.1), cuando a propósito de Holland se señaló que los agentes deben recibir mensajes válidos, esto es, que puedan ser procesados mediante las reglas que los rigen. Así, la noción de información adquiere cierta relatividad. Por ejemplo, si alguien interceptara un mensaje cifrado, quizá sospecharía que éste contuviera cierta información según el contexto, pero se podría decir que no contiene información *para él*, si es que desconoce la regla o conjunto de reglas mediante las que se cifró el mensaje. Sin embargo, para aquél que envió el mensaje sí la posee, y es de esperar que también la poseía para aquél a quien le fue enviado.

El tema de la relatividad se puede concretar cuando se piensa acerca de los soportes de información, es decir, cuando se trata de responder a la pregunta expuesta más arriba: ¿qué relación tiene la información con la materia y la energía? En un primer momento podría pensarse que la información siempre necesita un soporte “material”, como textos, discos duros, electricidad, cables, luz, etc. Pero Bertalanffy plantea una cuestión: “Es fácil, sin embargo, dar ejemplos en los cuales la información fluye en sentido opuesto a la energía, o en los que es transmitida información sin que corran energía o materia. El primer caso se da en un cable telegráfico, por el que va corriente en una dirección, pero es posible enviar información, un mensaje, en una u otra dirección, interrumpiendo la corriente en un punto y registrando la interrupción en otro. A propósito del segundo caso, piénsese en las puertas automáticas con sistema fotoeléctrico: la sombra, la suspensión de la energía luminosa, informa a la celda de que alguien entra, y la puerta se abre. De modo que la información, en general, no es expresable en términos de energía.” (Bertalanffy, 42)

Parece entonces que la información, efectivamente, necesita un soporte material (¿cómo iba

a transmitirse si no?), pero no puede identificarse con esa materia y esa energía que la soportan. Más bien habría que decir que el uso de información implica el uso de materia y energía, pero que la información no puede identificarse con ellos. Y si no es ni materia ni energía, ¿qué es?

Recapitulando, tenemos lo siguiente: la comunicación es la transmisión de información por parte de una fuente hacia un receptor. La información es una serie de mensajes codificada a través de un conjunto de reglas, que tanto emisor como receptor han de conocer. A la aplicación de reglas para el manejo de información se le puede llamar procesamiento, y al sistema formado por el agente y las reglas necesarias para el manejo de información, se le puede llamar sistema de procesamiento. Por tanto, para que haya información ha de haber sistema de procesamiento, pues como se dijo, si el receptor (fallido) no conoce las reglas, no hay realmente información *para él* (y si no hay reglas no hay sistema de procesamiento).

Siguiendo este hilo, se puede tratar de explicitar en qué sentido se concreta el tema de la relatividad de la información y a la vez tratar de responder de alguna manera a la pregunta acerca de qué es la información (si es que no es ni materia ni energía, pero las necesita). La concreción proviene de que se ha establecido finalmente de qué depende la aparición de la información: del sistema de procesamiento. La pregunta acerca de qué sea la información es más compleja, pero en parte depende de la respuesta anterior. La información, como se ha dicho, puede instanciarse en una infinidad de formas, dependiendo del sistema del que se hable, de modo que puede decirse que se trata, simplemente, de un concepto abstracto que sirve para denominar, dentro de ciertas situaciones, a los elementos que provocan un cambio de estado concreto (o un conjunto de ellos) en los agentes poseedores de las reglas que les permiten actuar siguiendo ciertos patrones al interactuar con dichos elementos. Por ello, quizá se pueda aventurar que la información no es ni materia ni energía, pero siempre que se hable de procesamiento de información, se hablará de elementos materiales y energéticos actuando de la manera descrita. Sin embargo, esta idea necesita varias precisiones provenientes de la termodinámica, como se verá a continuación.

### 2.3.3. Termodinámica

La idea de que el uso de información conlleva uso de energía proviene de un antiguo problema referente a la termodinámica, cuyos sucesivos intentos de solución se fueron acercando hacia la noción de información.

En primer lugar: la termodinámica es la ciencia, o rama de la física, que describe la energía y sus interacciones con la materia (Mitchell, 41). Los conceptos más básicos que utiliza son: energía, trabajo y entropía.

- La energía es el potencial de un sistema para llevar a cabo un trabajo
- El trabajo es la cantidad de fuerza aplicada a un objeto multiplicada por la distancia recorrida por el objeto en la dirección en que la fuerza fue aplicada
- La entropía es la cantidad de energía que no puede ser convertida en trabajo y se pierde en forma de calor

Haciendo uso de estas nociones básicas, se pueden enunciar las dos leyes fundamentales de la termodinámica, que se aplican a sistemas aislados, es decir, que no intercambian energía con el exterior:

“First law: Energy is conserved. The total amount of energy in the universe is constant. Energy can be transformed from one form to another, such as the transformation of stored body energy to kinetic energy of a pushed car plus the heat generated by this action. However, energy can never be created or destroyed. Thus it is said to be “conserved.” Second law: Entropy always increases until it reaches a maximum value. The total entropy of a system will always increase until it reaches its maximum possible value; it will never decrease on its own unless an outside agent works to decrease it.” (Mitchell, 42)

Es decir:

1. La energía total del sistema se conserva, aunque se transforme de unos tipos en otros
2. La entropía de un sistema siempre crece hasta alcanzar un valor máximo

De esta segunda ley se dice que define la “flecha del tiempo”, ya que el crecimiento de la entropía es irreversible, y por tanto el futuro se puede definir como la dirección en la que la entropía crece (Mitchell, 43).

El problema originario que llevará al uso de la noción de información es el que se conoce como “demonio de Maxwell”. Maxwell quiso argumentar que la segunda ley de la termodinámica no era tal, sino sólo una generalización estadística, de modo que en 1871 propuso un experimento mental en el que la entropía decrecía dentro de un sistema: un “demonio” (supongamos de manera muy general que es cualquier tipo de agente) está encerrado en una habitación llena de partículas lentas (frías) y rápidas (calientes). Esta habitación está dividida en dos por una pared, y el único punto de comunicación entre los dos compartimentos lo constituye una puerta que el demonio controla. Éste, cuando una partícula caliente se acerca, abre la puerta y la deja pasar a la otra parte de la habitación. Con el tiempo, todas las partículas calientes han quedado en un lado, y las frías en el otro,

aumentando el orden y por tanto disminuyendo la entropía, ya que lo caliente se ha vuelto más caliente y lo frío más frío, en vez de permanecer en un estado templado. De modo que sin un trabajo, sólo el uso de la inteligencia del demonio, ha disminuido la entropía, que es justo lo contrario de lo que enuncia la segunda ley. Maxwell argumentó que la ley era una generalización que servía para los objetos macroscópicos, pero que no tenía por qué cumplirse en el nivel de las moléculas individuales (Mitchell, 43-5).

En 1929, Leo Szilard propuso que era precisamente la inteligencia del demonio, es decir, el acto de obtener información del medio a través de mediciones, lo que constituía el trabajo perdido en el sistema. El demonio utiliza un *bit* de información (la información acerca de si la partícula es de tipo rápido o de tipo lento) cada vez que realiza la decisión de abrir la puerta, lo cual consume energía. Según Szilard, esto produce más entropía que la que decrece ordenando las partículas, de modo que la segunda ley se cumple dentro del sistema (Mitchell, 45).

En los años 80, Charles Bennett mostró que, teóricamente, cualquier computación puede llevarse a cabo sin gasto de energía (lo que invalida la solución anterior), pero apuntó a una precisión que en los años 60, el físico Rolf Landauer hizo a la solución de Szilard: no es el acto de medir, sino el de borrar datos el que incrementa la entropía, ya que el borrado es irreversible. Estas dos ideas en conjunto dan una solución aparentemente sólida<sup>14</sup> al problema planteado por Maxwell, ya que sucede lo siguiente: aunque el demonio pueda llevar a cabo la computación (es decir, el procesamiento de información acerca de la velocidad de las partículas que se mueven en la habitación) sin gasto de energía, en algún momento debe borrar la memoria, esto es, los datos que tiene almacenados, para poder seguir almacenando más. De no ser así, el demonio tendría una capacidad de memoria infinita, lo cual resulta absurdo. Y en definitiva, al borrar la memoria, aumenta la entropía, de modo que la segunda ley queda resguardada de nuevo.

#### 2.3.4. Memoria, orden y entropía

La principal característica que Bertalanffy atribuía a los sistemas abiertos es el ser capaces de escapar a la entropía, de aumentar su orden, pero sin violar la segunda ley de la termodinámica, pues al importar orden exportan su desorden al exterior. Esto lo hacen los sistemas abiertos por sí mismos, a través de lo que se llamó regulaciones primarias.

Mitchell (71-9) expone ideas parecidas cuando dice que la vida es un contraejemplo de la tendencia de todos los sistemas de ir hacia la máxima entropía, ya que estos sistemas se vuelven

---

<sup>14</sup> Que aun hoy en día no todos los físicos aceptan.

más organizados debido a la selección natural.

Prigogine, a través de la termodinámica irreversible y el concepto de estructura disipativa, trata de describir este tipo de fenómenos, argumentando que el universo no tiende hacia el desorden:

“La evolución del universo no ha sido en la dirección de la degradación, sino en la del aumento de la complejidad, con estructuras que aparecen progresivamente a cada nivel, de las estrellas y las galaxias a los sistemas biológicos.” (Prigogine, 97) La aparición de estructuras en el universo es una manifestación de la complejidad, de la cual los sistemas vivos constituyen un escalón más.

Johnson también observa este tipo de fenómenos, y al tratar de caracterizar a los sistemas complejos como aquéllos que mantienen o aumentan su orden, los dota de apertura, y por ende, de memoria. Al igual que Bertalanffy, utiliza la dicotomía sistema abierto/sistema cerrado, pero es de suponer que ambos lo hacen de manera diferente, ya que las respectivas descripciones de los mecanismos de regulación no terminan de encajar. Johnson caracteriza de forma muy general la apertura como la capacidad del sistema para ser afectado por el medio, y el carácter cerrado, como lo contrario. De esta forma alguno de los sentidos que le atribuye al *feedback*, parece coincidir bastante con lo que Bertalanffy llamará retroalimentación: el *output* del sistema vuelve en parte al *input*. Por ejemplo, en el caso del empleado usando la ecuación logística. Pero Bertalanffy afirma que la retroalimentación no puede ser la característica básica de los sistemas abiertos, sino de los cerrados.

La clave para deshacer el entuerto parece estar en que Johnson no utiliza nada parecido a la distinción entre regulaciones primarias y secundarias, de modo que cuando habla de sistemas abiertos, parece estar refiriéndose a ambos tipos de regulaciones al mismo tiempo. Para él, los sistemas abiertos intercambian energía e información con el medio. En cambio, para Bertalanffy, los sistemas cerrados intercambian información (ya que está pensando en sistemas como los cibernéticos), y sólo los abiertos intercambian información y energía. Sin embargo, la idea básica de ambos autores es la de que este intercambio de información y energía permite aumentar el orden del sistema, puesto que da origen a la complejidad.

Introduciendo la noción de sistemas aislados se puede encauzar el problema. Un sistema aislado podría ser aquél cuya relación con el medio no implique uso de información, y si acaso implica gasto de materia y/o energía (como seguramente suceda), éste puede ser despreciable en cuanto a la complejidad se refiere. Por ejemplo, una mesa no hace uso de información alguna y sufre desgaste con el tiempo, lo que no hace sino aumentar su desorden hasta que debe ser reparada o

reemplazada. Lo mismo se podría decir, por ejemplo, de una batería: simplemente pierde energía hasta que es desechada o recargada de forma externa. De esta manera, lo que Johnson llama sistemas cerrados, podría renombrarse como sistemas aislados, y lo que llama sistemas abiertos, englobaría tanto lo que Bertalanffy llama abierto como lo que llama cerrado, siempre que se tome el concepto de *feedback* de forma muy general, como a veces el autor parece hacer cuando lo equipara a “interacción con el medio”.

Sin embargo, la diferencia permanece: Johnson no centra demasiado su atención en la “autocreación” del sistema, en la sustitución de elementos que mantiene la estructura. Otros autores, como Maturana y Varela, sí tuvieron en cuenta este fenómeno como algo absolutamente relevante. El examen de uno de sus conceptos centrales, la *autopoiesis*, tal y como se expone en “De máquinas y seres vivos”, puede contribuir a completar la visión de la complejidad en general, y el enfoque orgánico de Bertalanffy en particular.

A lo largo del texto citado, Maturana y Varela hablan de máquinas, pero no en el sentido habitual, sino que definen la máquina como un conjunto de componentes con ciertas propiedades, los cuales se organizan formando unas relaciones, pero, advierten, las propiedades individuales de los componentes son irrelevantes. Lo importante de las máquinas es el conjunto de relaciones que las sostiene, y las propiedades individuales de las partes sólo tendrán importancia en la medida en que intervienen en el mantenimiento de esas relaciones (Maturana y Varela, 67). A partir de esta noción de máquina, pretenden describir a los organismos vivos como una *máquina autopoietica*, cuya forma de ser puede expresarse así:

“Una máquina autopoietica es una máquina organizada como un sistema de procesos de producción de componentes concatenados de tal manera que producen componentes que: i) generan los procesos (relaciones) de producción que los producen a través de sus continuas interacciones y transformaciones, y ii) constituyen a la máquina como una unidad en el espacio físico. Por consiguiente, una máquina autopoietica continuamente especifica y produce su propia organización a través de la producción de sus propios componentes, bajo condiciones de continua perturbación y compensación de esas perturbaciones (producción de componentes).” (Maturana y Varela, 69)

La autopoiesis, por tanto, consiste en la autoproducción del organismo: éste está formado por partes, las cuales están organizadas de una cierta manera; esta organización le permite actuar en el medio de tal modo que consigue crear y mantener las propias partes que lo componen. Esto hace que el organismo se constituya como una unidad frente al entorno, ya que todos los procesos que

lleva a cabo están referidos hacia él mismo; se convierte en una especie de centro: “sistemas en los que todo lo que pasa con ellos en su operar como unidades discretas, tanto en su dinámica relacional como en su dinámica interna, se refiere sólo a ellos mismos, y ocurre como una continua realización de sí mismos en una dinámica relacional en la que el resultado no es un factor en los procesos que le dan origen.” (Maturana y Varela, 12)

Este tipo de organización, en la que la estructura se mantiene, puede denominarse constante. La organización constante puede ser estática o dinámica. Dentro de las dinámicas, distinguen las *alopoiéticas* y las *autopoiéticas*. Interesan principalmente estas dos últimas, ya que las estáticas salen fuera del campo de la autoproducción.

Las máquinas alopoiéticas son aquellas que “producen con su funcionamiento algo distinto de ellas mismas —como en el caso del automóvil. Estas máquinas no son autónomas, ya que los cambios que experimenten están necesariamente supeditados a la producción de un producto distinto de ellas.” (Maturana y Varela, 71) Además, como no constituyen una unidad por sí mismas, es el observador el que establece sus límites. Se podría decir que tienen una estructura de entradas y salidas, al estilo de las máquinas cibernéticas.

En cambio, las máquinas autopoiéticas poseen una individualidad independiente del observador, pues al dirigir hacia sí mismas todos sus procesos, se constituyen como unidad independiente. Además, a diferencia de las alopoiéticas, mantienen fijas las relaciones entre los componentes, no los componentes mismos.

Hasta ahora se pueden observar algunos puntos en común con las ideas de Bertalanffy:

- Ambas partes tratan de alejarse del enfoque analítico y apuestan por una visión más centrada en las relaciones entre los componentes de los sistemas. También poseen todos una visión influida por la biología, que les lleva a centrarse en el tema de la autoproducción.
- Los sistemas abiertos son entidades que, intercambiando información y energía con el medio, son capaces de mantener su estructura aunque se cambien y repongan sus componentes. Además, son susceptibles de autorregularse frente a las perturbaciones. Ésta también podría ser la descripción de las máquinas autopoiéticas.
- La distinción alopoiético/autopoiético resulta similar a la de cerrado/abierto. Los sistemas alopoiéticos, al igual que los cerrados, no se autoproducen y tienen una estructura de entrada/salida. No se especifican los mecanismos de regulación de la alopoiesis, de modo que quizá no se pueda llevar más allá la comparación.

Otro de los puntos en los que parece haber ideas en común es en el acoplamiento. Maturana y Varela sostienen que varias unidades autopoiéticas pueden unirse para conformar una unidad autopoiética mayor: “Cada vez que el comportamiento de una o más unidades es tal que hay un dominio en que la conducta de cada una es función de la conducta de las demás, se dice que ellas están acopladas en ese dominio. El acoplamiento surge como resultado de las modificaciones mutuas que las unidades interactuantes sufren, sin perder su identidad, en el transcurso de sus interacciones.” (101) Pero además, afirman que algunas de estas unidades autopoiéticas pueden tomar el papel de unidades alopoiéticas dentro de estos acoplamientos, aunque con alguna restricción: “cuando se describe un sistema autopoiético como jugando un papel alopoiético en su calidad de componente de un sistema más amplio, la descripción se refiere solamente a su participación en la producción de relaciones que adoptan la forma propia de un sistema alopoiético.” (104) Es decir, que el componente no pierde su calidad de autopoiético, pero en cuanto a su papel dentro del sistema, “produce” relaciones que no están orientadas a su propia conservación. Bertalanffy proponía que en los sistemas abiertos se da el anidamiento de unos sistemas dentro de otros, así como una progresiva mecanización, o sea, una aparición de cadenas causales más o menos autónomas, que en algunos casos podían funcionar como sistemas cerrados.

En cuanto al concepto de teleología, ambas partes parecen opinar que no es sino un concepto que puede resultar útil en la descripción de los comportamientos, pero que realmente no forma parte constitutiva del sistema. No hay causa final. (Maturana y Varela, 75-6)

Pese a estas semejanzas, puede que algunos puntos de fricción entre los autores muestren diferencias profundas. Maturana señala uno de ellos:

“científicos como von Bertalanffy que insistían en considerar a los seres vivos como totalidades con un criterio sistémico, hablaban de una visión organísmica, y parecían considerar que lo central para comprender a los seres vivos, era tratarlos como sistemas abiertos procesadores de energía. Yo, en cambio, pensaba que lo central para explicar y comprender a los seres vivos era hacerse cargo de su condición de entes discretos, autónomos, que existen en su vivir como unidades independientes. De hecho yo pensaba, y aún lo pienso, que lo central de la biología como ciencia es que el biólogo trata con entes discretos y autónomos que generan en su operar fenómenos generales en tanto se parecen, mientras que lo central en la física como ciencia es que el físico trata, por el contrario, con leyes generales, sin atender a lo particular de los entes que las realizan.” (Maturana y Varela, 11)

Hay que recordar que lo que Bertalanffy pretende es construir una teoría general de los

sistemas. La condición de posibilidad de esta teoría consiste básicamente en el isomorfismo que existe entre las leyes de algunos campos, el cual es más que una mera analogía, y permite la extracción de principios generales (Bertalanffy, 33-7). A partir de un sistema de ecuaciones diferenciales, Bertalanffy deriva a priori algunas de estas leyes que actúan en varios campos, demostrando su identidad formal (67).

De este modo, Bertalanffy parece proceder partiendo de fórmulas generales, deduciendo de ellas las propiedades particulares de cada tipo de sistema, o al menos algunas de las leyes que rigen ciertos tipos de sistemas. En este movimiento, el hecho de la identidad o singularidad de cada sistema abierto se presenta como una consecuencia de los mecanismos que lo rigen (intercambio con el medio, autoproducción, mecanización, etc.). Por el contrario, en el texto de Maturana y Varela parece presentarse en primer lugar, como señala Maturana en el párrafo citado, la discreción y autonomía del ser vivo, como punto central de la reflexión acerca de la autopoiesis, que es el mecanismo utilizado para explicar su individualidad, y no al revés.

Resultaría difícil establecer hasta qué punto esta situación marca una diferencia en el resultado final de la investigación, y lo más probable es que la mejor opción consista en una complementación de ambas maneras de proceder. La ciencia parece marchar encontrando problemas, inventando soluciones y después tratando de formalizarlas mediante conceptos, lógica, matemáticas, etc. Bertalanffy realmente parte de un problema distinto al que se enfrentan Maturana y Varela; el primero pretende crear un campo interdisciplinar, tratando de aportar unidad y economía al conocimiento; los segundos, tratan de explicar qué es lo que hace que llamemos “vivos” a algunos seres. Sus caminos se entrecruzan en algunos tramos y puede que sus visiones se complementen, pero parece claro que sus intenciones difieren bastante.

### 3. MODELOS Y COMPUTACIÓN

Uno de los principales objetos de estudio de este trabajo es, en líneas generales, la posibilidad de la descripción formal de los sistemas complejos. El motivo principal que lleva a centrarse en estas líneas reside en la investigación acerca de la relación entre modelos computacionales, lenguajes formales y la creación de una teoría de los sistemas complejos, cuya falta hoy en día supone una carencia importante para este campo de estudio.

Para explicar estas relaciones entre modelos y teorías, así como para enmarcar la tarea de la filosofía dentro de este tipo de investigaciones es necesario, en primer lugar, la presentación clara de estos conceptos. Además, tratarán de ilustrarse algunas de las pretensiones de este trabajo

mediante ejemplos concretos provenientes de algunos autores. Así, se estará en condiciones de enmarcar el estudio de la mereología dentro del estudio de los sistemas complejos.

### 3.1. La noción de modelo

Antes de dar algunas notas sobre el concepto de modelo computacional, es necesario aclarar la noción de modelo en general, tal y como se entiende comúnmente en lógica y matemáticas.

En primer lugar, un sistema puede describirse como una construcción teórica que se lleva a cabo sobre cierta porción de la realidad que estamos estudiando. Esta porción está constituida por una multitud de individuos, propiedades, relaciones, etc. de entre la cual se destaca un determinado conjunto, llamado universo del sistema, que contiene:

1. Los individuos que componen el sistema: estrellas, planetas, moléculas, etc.
2. Las relaciones en que se encuentran estos individuos, siendo la relación monaria (relación con un solo argumento) lo que se corresponde en general con el término 'propiedad' del lenguaje corriente. Por ejemplo: 'conduce la electricidad', 'es un subconjunto de', etc.
3. Las funciones que se aplican a los individuos. Por ejemplo, '+' en aritmética, o 'el spin de' en física. Las funciones, a diferencia de las relaciones, devuelven un objeto y no un valor de verdad. Por ejemplo, al aplicar '+' sobre los objetos '3' y '5' obtenemos '8'; sin embargo, si aplicamos la propiedad 'ser madrileño' sobre el objeto 'Dostoievski', el resultado es la falsedad (porque el escritor en cuestión no es madrileño).

Acerca de la idea de individuos distinguidos o destacados cabe hacer una precisión. Al estudiar un fenómeno, es posible que encontremos una enorme cantidad de elementos que lo componen o intervienen en él; sin embargo, no nos suele interesar la totalidad de estos elementos, sino que sólo queremos estudiar algunos de ellos. Por ejemplo, si se está estudiando la trayectoria de un proyectil para tratar de predecir dónde impactará, seguramente no nos interese en absoluto el color del proyectil o el nombre de la persona que lo disparó, pero sí debemos tener en cuenta la velocidad y dirección iniciales del proyectil, la altura a la que fue disparado, la velocidad del viento, etc. Es decir, los elementos que influyen en el fenómeno a estudiar. Estos elementos influyentes son los destacados.

Una manera de dotar de potencia, simplicidad y precisión a una teoría es la formalización. Esta formalización se lleva a cabo mediante lo que se denomina 'lenguaje formal', que es un conjunto de

signos vacíos de significado que, mediante unas reglas de composición, permite crear expresiones compuestas. Por ejemplo, la lógica de primer orden se compone de un conjunto de variables ( $x, y, z, \dots$ ) que pueden usarse para designar un individuo cualquiera del universo del discurso. Un conjunto de relatores, que sirven para expresar relaciones. Un conjunto de funtores, que se utilizan para expresar funciones. Las constantes individuales ( $a, b, c, \dots$ ) que permiten designar individuos. Los conectores ' $\neg$ ', ' $\vee$ ', ' $\rightarrow$ ', etc. utilizados para componer sentencias. Los cuantificadores ' $\exists$ ' y ' $\forall$ ', que sirven para expresar la cantidad de individuos a que se refiere una sentencia (todos, algún). Por último, el signo de identidad ' $=$ '.

Por su parte, una teoría deductiva consta de dos conjuntos de elementos: el de los principios y el de los derivados a partir de estos principios. A su vez, contiene dos tipos de expresiones: términos y enunciados. Todos estos componentes se organizan así:

- (1) Los principios tienen la peculiaridad de que se utilizan sin demostrar o sin explicar su significado.
  - (a) Cuando un principio es un término, se le llama 'término primitivo';
  - (b) cuando es un enunciado, se le suele llamar 'axioma'.
- (2) Por su parte, los elementos derivados son demostrados o definidos a partir de los principios.
  - (a) A los enunciados derivados se les llama 'teoremas'
  - (b) y a los términos, 'términos definidos'.

Esta estructura es necesaria porque si se pretendiera demostrar todo enunciado o definir todo término que entra en juego en una teoría, se caería en una regresión al infinito.

Los enunciados que establecen, a partir de términos primitivos o ya definidos, el significado de un nuevo término definido, se llaman 'definiciones'. Por su parte, a los procesos que establecen mediante demostraciones la relación entre los teoremas y los enunciados y términos primitivos, se les llama 'pruebas'. Cuando los teoremas son demostrados, se dice que están respecto de sus premisas (los enunciados que se han utilizado para demostrarlos) en una relación de consecuencia. Estas premisas pueden ser o bien axiomas, o bien teoremas previamente demostrados, o ambos.

Una teoría deductiva que haya sido expresada en un lenguaje formal como el expuesto más arriba, se denomina teoría formalizada.

### 3.1.1. Un ejemplo de teoría y modelo

Supongamos que tenemos una teoría deductiva formalizada como la siguiente:

- Consta de un conjunto  $C$  de elementos denominado 'universo del discurso'.
- Consta de variables  $x, y, z, \dots$  que pueden referirse a cualquier elemento de ese conjunto
- Por último, consta de un único término primitivo, encarnado en la relación  $R$
- Las propiedades de esta relación  $R$  quedan exhibidas por los siguientes axiomas:
  - Axioma 1:  $\forall x (xRx)$  [es decir, que cualquier elemento del conjunto  $C$  está en la relación  $R$  consigo mismo]
  - Axioma 2:  $\forall xyz ((xRz \wedge yRz) \rightarrow xRy)$  [es decir, dos elementos del conjunto  $C$  que están en la relación  $R$  con el mismo tercer elemento, también están en la relación  $R$  entre sí]

A partir de estos elementos se pueden demostrar teoremas como el siguiente:

- Teorema 1:  $\forall yz (yRz \rightarrow zRy)$  [o sea, que la relación  $R$  es simétrica]. Prueba:
  - Si sustituimos en el Axioma 2 la  $x$  por  $z$ , tenemos:  $\forall zy ((zRz \wedge yRz) \rightarrow zRy)$
  - Si sustituimos en el Axioma 1 la  $x$  por  $z$ , tenemos:  $\forall z (zRz)$
  - De esta manera, hemos conseguido el primer enunciado que forma parte de la conjunción en la fórmula de la línea anterior. Por ello, ya se puede eliminar de dicha fórmula, obteniendo  $\forall zy (yRz \rightarrow zRy)$ , que es el teorema que se quería demostrar.

Así, se ha probado el Teorema 1 a partir de los dos axiomas, la regla de sustitución y la regla de eliminación de la conjunción. Estas reglas de inferencia han debido ser definidas previamente en el lenguaje que se está utilizando, o dicho de otra manera, las pruebas que llevemos a cabo en nuestra teoría presuponen las reglas y leyes de la lógica, las cuales han sido demostradas de manera independiente.

Lo que tenemos hasta ahora es una teoría sin interpretar. Se ha dicho que la teoría se refiere a un conjunto  $C$ , pero no se ha especificado el contenido de ese conjunto, es decir, que aún no se ha dicho acerca de qué elementos versa la teoría. A su vez, los axiomas y teoremas aún no son ni

verdaderos ni falsos; simplemente son funciones proposicionales, esquemas susceptibles de ser verdaderos o falsos. Una vez que se establece el contenido del universo del discurso y se elige la relación que será designada por  $R$ , se podrá decir que la teoría está interpretada. Más arriba se dijo que el sistema está conformado por los individuos destacados de una porción de la realidad. Pues bien, estos elementos destacados y sus relaciones y propiedades son los que servirán para interpretar la teoría y dotar de contenido al universo del discurso. Cuando los individuos destacados elegidos hacen de los axiomas y teoremas de la teoría proposiciones verdaderas, se dice que la interpretación satisface la teoría y, por tanto, el sistema formado por esos individuos, constituye un modelo de dicha teoría. Por tanto, para interpretar una teoría es necesario:

- Una estructura o sistema: el conjunto conformado por los individuos relevantes de la porción de la realidad a estudiar
- Una valoración: por ejemplo, los valores de verdad y falsedad que se pueden aplicar a los enunciados cuando se corresponden o no con los hechos

Por ejemplo, en la pequeña teoría presentada, se puede interpretar  $R$  como el símbolo de congruencia  $\cong$ , y el conjunto  $C$ , como el conjunto de todos los segmentos. Así, la teoría se convertiría en una axiomatización de la relación de congruencia, y a partir de las afirmaciones verdaderas en que se han convertido los axiomas (“todo segmento es congruente consigo mismo” y “dos segmentos congruentes con un tercero son congruentes entre sí”) permitirá la prueba de otras afirmaciones verdaderas, como el probado Teorema 1 (“si  $a$  es congruente con  $b$ , entonces  $b$  es congruente con  $a$ ”) u otras como “si  $a$  es congruente con  $b$  y  $b$  lo es con  $c$ , entonces  $a$  lo es con  $c$ ” (es decir, la transitividad de la congruencia).

Es posible, para algunas teorías, encontrar más de un modelo. Por ejemplo, también es un modelo de la teoría presentada el sistema formado por el conjunto o clase universal ( $V$ ) y el símbolo de identidad ( $=$ ).

Con todos estos elementos en la mano, ya se puede reconstruir la definición de modelo: un conjunto de elementos es un modelo de la teoría si constituye un sistema que satisface los axiomas y teoremas de dicha teoría, codificada en un determinado lenguaje. Es decir, que cuando aplicamos la teoría sobre el sistema, obtenemos sentencias verdaderas.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> Basado en (Mosterín, 211-31), (Tarski, 109-116) y (Benítez2, 272-286).

### 3.2. Más allá de la imitación

Un modelo<sup>16</sup> computacional es la implementación de un modelo en un computador. Esto se puede hacer a través de un lenguaje de programación o bien a través de software específico para simulaciones. Una simulación será entonces la ejecución de un modelo en el computador. Cuando se habla de computación, se está hablando de procesos computacionales, es decir, un flujo o sucesión de instrucciones. (Abelson y Sussman, cap. 1) Esto añade al estudio a través de modelos otra ventaja: el dinamismo. Cuando se consigue implementar el modelo y se pone en marcha, las sucesivas iteraciones nos muestran cómo evoluciona el sistema a lo largo del tiempo.

Más arriba se dijo (2.2.3) que los modelos computacionales son algo más que ingeniosos reflejos de la realidad: son un método para investigarla. Por esta razón pueden postularse como auténticas fuentes de conocimiento. A continuación se presentan algunos de los usos más comunes de este tipo de modelos, que muestran su estatuto de fuente epistémica. En general, simulamos con estas finalidades:

“a) Cuando buscamos comprender (y explicar) procesos fundamentales;

b) Cuando queremos que un fenómeno o sistema se comporte como deseamos/desearíamos;

c) Cuando queremos lograr ver emergencias, dinámicas, procesos, elementos y demás que no logramos ver (= comprender) habitualmente; es decir, justamente por fuera de la simulación y el modelamiento.” (Maldonado y Gómez2, 9)

Algunos autores afirman, no ya sólo que la modelización es un método útil para el estudio de sistemas complejos, sino que es *el* método de la investigación en complejidad (Maldonado y Gómez2, 13) o si no, al menos, una de sus herramientas esenciales:

“Debido a que los SCA son tan intrincados, sólo los modelos de computadora, con sus bien definidos y manipulables mecanismos, permiten dar un paso crucial en la búsqueda de las leyes que los rigen. En la parte en donde *mimetizan* fenómenos importantes de los SCA, estos modelos ponen los datos de dichos SCA en un formato riguroso, facilitando así la descripción de sus patrones y leyes.” (Holland, 109)<sup>17</sup>

En este texto quedan condensadas las características de los modelos computacionales que más interesan en el estudio de la complejidad:

---

<sup>16</sup> Existe cierta ambigüedad en el uso del término ‘modelo’: se ha visto que en un sentido formal significa un sistema que satisface una teoría. Sin embargo, en otras ocasiones, como en ésta, quiere decir algo así como ‘conjunto de algoritmos que emulan un sistema’.

<sup>17</sup> También: (Mitchell, 38-9)

1. Los mecanismos son
  - a. Bien definidos
  - b. Manipulables
2. Los datos se ordenan en un formato riguroso
3. Se facilita la investigación de las leyes

En primer lugar, un modelo consiste en un formato común, un mecanismo unificador que permite describir a todos los agentes de la misma manera, “cualquiera que sea su forma exterior”. (Holland, 107) Este formato común ha de estar formulado en un lenguaje claro, que permita la descripción de los comportamientos de manera unívoca, como es el caso de la propuesta de Holland, en la que se codifican las acciones y reacciones en un código binario y más tarde se relacionan a través de implicaciones lógicas.

El modelo resultante es, en segundo lugar, manipulable. Esta es una característica común a todos los modelos computacionales (no sólo en el campo de los sistemas complejos) que resulta del todo esencial: una vez que tenemos el modelo ‘en nuestro poder’, podemos hacer con él lo que queramos. Es decir, podemos manipular todas las variables y observar cómo difieren los resultados finales, lo cual nos puede ayudar en la comprensión del comportamiento del sistema, así como de sus propiedades y principios internos.

Asimismo, un modelo puede proporcionar una manera sistemática de organizar los datos. Piénsese, por ejemplo, en el caso de Tycho Brahe y su extenso registro de observaciones astronómicas (Holland, 108) y en cómo Kepler ideó un modelo a base de órbitas elípticas, el cual podría funcionar como generador de esos datos. De esta manera se obtiene un conjunto de enunciados (el modelo) que permite hacer uso de los datos (en forma de predicciones). Sin el modelo, el conjunto ordenado de observaciones de poco serviría en cuanto a aplicaciones prácticas.

Debido a estas características, el modelo computacional se presenta como una herramienta muy útil para la investigación en general, e imprescindible en campos como el de los sistemas complejos, en los que se dan, no sólo ingentes cantidades de posibles observaciones, sino grandes dificultades para extraer datos de ellas, ya que el experimentador no suele poder manipular los sistemas reales a su antojo.

Este tipo de modelado no se presenta como un sustituto de la teoría ni de la experimentación, sino más bien como un puente entre ambos: “Mirando hacia atrás, para ver los datos, podemos

verificar si las consecuencias son verosímiles; mirando hacia delante, hacia la teoría, podemos ver si se siguen los principios generales". (Holland, 110)

Se han visto algunas de las características de los modelos computacionales, así como su posible papel en el estudio de la complejidad. Como se ha dicho, para implementar un modelo en el computador, se ha de poseer previamente un modelo formal del sistema, o al menos una descripción rigurosa y sin ambigüedades de los aspectos relevantes a estudiar, la cual facilite la traducción al lenguaje informático elegido. Cabe, por tanto, hacer algunas observaciones acerca de la formalización, no ya de sistemas en general, sino de los sistemas complejos en particular.

### 3.3. Formalizar la complejidad

El peculiar comportamiento que exhiben los sistemas complejos provoca, como se ha visto, que los métodos analíticos tradicionales se muestren infructuosos para su estudio<sup>18</sup>. Esto es así porque precisamente a través del análisis se pierde lo complejo: si nos quedamos con los individuos y eliminamos la emergencia y el comportamiento colectivo, ya no tenemos un sistema complejo. Por lo tanto, parece que se hacen necesarios métodos específicos de elaboración de teorías y modelos que puedan dar cuenta de los atributos de la complejidad.

#### 3.3.1. Hiperestructuras

Si se quiere elaborar modelos formales de sistemas complejos y, a fortiori, modelos computacionales para su estudio, se ha de estar en condiciones de poder expresar con algún lenguaje las peculiaridades de estos sistemas. Por ejemplo, si se modela un sistema de partículas que se enlazan de tal manera que dan lugar a un compuesto con propiedades que las partículas no tenían, podría resultar muy interesante poder plasmar ese nuevo nivel emergente en el modelo, sobre todo si se quieren estudiar procesos de complejidad creciente. Siguiendo con el ejemplo de las partículas, si se quisiera ver cómo los nuevos compuestos pueden interactuar para dar lugar a otros 'meta-compuestos', parece claro que las nuevas propiedades habrán de pasar a formar parte del modelo, sin olvidar que provienen de la interacción de aquellas partículas primitivas.

En algunos de sus trabajos, Nils Baas ofrece una interesante propuesta al respecto. La idea básica es la noción de *hiperesctructura*. Si

- 'S' es una familia o sistema de agentes,

---

<sup>18</sup> Por ejemplo, tanto en (Bertalanffy, 19) como en (Holland, 137-8) se hace referencia al hecho de que los sistemas de ecuaciones diferenciales tienen serias limitaciones en el estudio de este tipo de sistemas, siendo sustituidas en parte por la investigación mediante computadores.

- 'Int' son las interacciones entre los agentes,
- 'Obs' es el mecanismo de observación, entonces
- $S^2 = R(S^1, Obs^1, Int^1)$  es la hiperestructura (de nivel 2) formada por el resultado ('R') de las interacciones de los agentes del nivel inmediatamente inferior, siendo 'i' el número, finito o infinito, de sistemas o agentes (Baas1, 517) y
- una propiedad 'P' será emergente si y sólo si pertenece a  $Obs^2(S^2)$  pero no pertenece a  $Obs^2(S^1)$ .

El sentido del mecanismo de observación es el siguiente: las propiedades sólo aparecen ante algún tipo de interacción. Es decir, que si un objeto cualquiera no interactúa con nada, no 'desenvuelve' sus potencialidades, cualidades, etc. y por tanto éstas no podrán ser recogidas por ningún organismo cognoscente. Se utiliza el término 'mecanismo' de forma muy amplia, tratando de asociarlo no sólo a un observador o experimentador haciendo uso de sus órganos e instrumentos, sino a todo lo que pueda 'poner en marcha' las propiedades de un objeto. Así, podría ser denominado 'mecanismo de observación' tanto a un biólogo observando el comportamiento de unas bacterias en el microscopio como al entorno con el que interactúan los animales y que hace que desplieguen sus capacidades de supervivencia, es decir, su nicho. (Baas1, 533) En cada nivel, Obs puede ser o no el mismo que en niveles anteriores, o sea, puede darse el caso de que  $Obs^1 = Obs^2$ .

De esta forma,  $Obs^n(S^n)$  no quiere expresar sino las propiedades del sistema en el nivel  $n$ , y la propiedad emergente tal y como se ha definido quedaría así: una propiedad P es emergente si y sólo si pertenece al conjunto de propiedades del nivel superior, y no al del inferior. El mecanismo general de formación de hiperestructuras es el siguiente:

"The formation principle for hyperstructures is basically that as soon as we have a family (collection) of structures, objects, or systems interacting (nonlinearly), new phenomena may be observed and a new higher-order structure—a next-level object—has been formed." (Baas1, 531)

Este principio puede estar compuesto por reglas que actúan recursivamente. Así, por aplicación sucesiva de una regla o conjunto de reglas a una estructura, y al resultado de esta aplicación, y al resultado de la aplicación a ese resultado, etc. se obtienen nuevas estructuras en cada iteración. (Baas1, 532) Sin embargo, no todo en la naturaleza es estrictamente recursivo, sino que parece funcionar más bien según una combinación de evolución, adaptación y recursión:

“We start out with the primitive objects as our primitive structures, then as *Int* we use the old recursive iteration process. At the same time we observe and register the system by a suitably chosen *Obs* mechanism.

*Obs* may be made (by nature or by us) such that certain structures in the process give a special signal for selection. This will then represent adaptation for specific purposes.

Then these structures –now second order– are being subjected to the same or new iterative rules and *Obs*, etc., according to the hyperstructure scheme chosen.” (Baas1, 533)

En este caso se han introducido la selección y el dinamismo. *Obs* ya no sólo se encarga de poner de relieve las propiedades en general, sino que, según un criterio, selecciona propiedades específicas. A su vez, el sistema cambia con el tiempo, pues las propiedades van siendo seleccionadas en oleadas sucesivas, por así decir.

El aparato formal que Baas utiliza para definir la noción de superestructura es una rama de las matemáticas llamada ‘teoría de categorías’. Se trata de una disciplina de alto nivel de abstracción que permite expresar de una forma general las propiedades, relaciones y jerarquías de grupos de elementos. Una categoría, que sería algo así como un todo, está compuesta de objetos y morfismos. Los objetos son los componentes del conjunto y los morfismos representan las diversas relaciones entre esos componentes.<sup>19</sup> Así, en el lenguaje de Baas un sistema sería una categoría, los componentes del sistema serían los objetos, y los morfismos en general serían las interacciones y mecanismos de observación. Una hiperestructura será entonces una categoría que contiene como objetos una o varias categorías de orden inferior.

Una de las aplicaciones que se proponen para este sistema formal es el estudio de las propiedades topológicas emergentes en algunos fenómenos físicos y químicos, en los casos en los que estas propiedades no son reducibles a las de los componentes. Por ejemplo, en química se dan unas estructuras llamadas *macrociclos*, en las que algunas partículas se enlazan formando una especie de anillo. (Baas2, 28) Estos macrociclos pueden a su vez encadenarse formando *catenanos*, que tienen la forma siguiente:



Esta estructura resulta trivial porque se puede reducir a pares de interacciones. Es decir, si

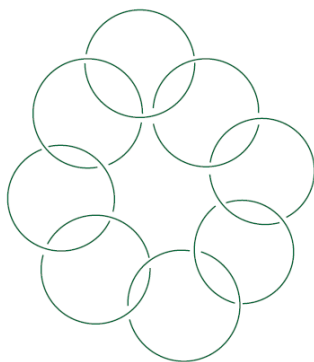
---

<sup>19</sup> <http://plato.stanford.edu/entries/category-theory/>

<sup>20</sup> (Baas2, 28)

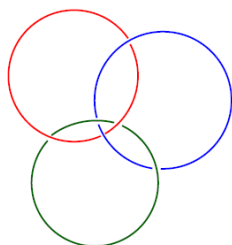
nombramos los anillos como 'A', 'B', etc. y a su catenano correspondiente como A-B-C-..., tenemos que los enlaces se pueden reducir a enlaces por pares: el catenano se reduce al enlace de A-B, B-C, C-D, etc.

Sin embargo, los macrociclos también pueden formar en ocasiones la estructura de un 'collar de Antoine', que tiene la siguiente forma:



21

De esta manera se crea un nuevo tipo topológico<sup>22</sup>, una estructura de estructuras, que no puede ser reducida a las partes componentes sin perder sus propiedades. Algo similar ocurre con las llamadas 'estructuras borromeas', que conforman un dibujo como el siguiente:



Esta estructura también resulta interesante por el hecho de que tampoco se puede reducir a pares de interacciones. Si 'cortamos' uno de los anillos, toda la estructura se deshace: no queda ninguna pareja unida. Los tres anillos forman así una unidad de orden superior. Todas estas formas pueden existir en la naturaleza y han sido sintetizadas químicamente por varios equipos de investigación. (Baas2, 29-30)

Del hecho de que en compuestos químicos reales se den estas estructuras topológicas con propiedades emergentes, puede surgir la idea de tratar de describir formalmente el proceso de aparición de estas interesantes formas. Baas utiliza su noción de hiperestructura y un lenguaje topológico homólogo al esbozado mediante la teoría de categorías. Y, yendo más allá, se pregunta si no será posible, a través de este lenguaje, estudiar las posibles estructuras que pueden emerger siguiendo este tipo de procesos, con la intención de describir formas que después sean susceptibles

---

<sup>21</sup> [Baas2, 29]

<sup>22</sup> Sobre topología: ver la subsección siguiente.

de plasmarse en la realidad material. [Baas2, 37] El desarrollo de esta conjetura podría llegar a tener aplicación en varios campos como la química sintética, la física nuclear, los sistemas mecánicos cuánticos de varios cuerpos o los gases ‘ultrafríos’, disciplinas en las que se han observado ya este tipo de estructuras. (Baas2, 41-2)

### 3.3.2. Ontología formal

La idea básica de Baas es que se puede tratar de expresar la estructura de los sistemas en algún lenguaje formal, para así describir los procesos básicos que los rigen y estudiar su dinámica en, al menos, dos sentidos, que coinciden en gran medida con los que Holland atribuye a los modelos computacionales (ver 3.2):

- mirando hacia atrás: estudiar el proceso que dio lugar a ciertas propiedades emergentes
- mirando hacia adelante: predecir nuevas formas posibles de un sistema complejo

En la tarea de desarrollar un lenguaje que sea apto para estos propósitos, pueden jugar un papel importante algunas de las herramientas que podemos encontrar dentro de la denominada ‘ontología formal’. El término proviene de Husserl, el cual propuso la distinción entre lógica formal y ontología formal. (Smith1, 19) La primera se ocuparía de las propiedades y relaciones (inferencia, consistencia, etc.) de las proposiciones en virtud de su mera forma. La segunda se ocupa de las relaciones y conexiones entre objetos, todos, partes, colectivos, etc. formales en tanto que pueden ser ejemplificados en principio por objetos materiales de cualquier esfera o dominio de la realidad.

Esta ontología formal está basada en tres teorías (Ib.): la mereología, la teoría de la dependencia y la topología. Las nociones de mereología y dependencia serán tratadas en extenso más adelante (ver capítulo 4), pero a modo de adelanto se podrían definir de manera muy general así: la mereología trata acerca de las relaciones entre las partes y los todos (contemplando las relaciones de pertenencia, solapamiento, suma, producto, etc.) y la teoría de la dependencia estudia, valga la redundancia, las relaciones de dependencia entre entidades. En general, una entidad depende de otra cuando no puede existir sin ella. Ambas teorías, la de mereología y la de dependencia, se encuentran muy relacionadas, pues se verá que el todo depende de las partes, que las propiedades del todo dependen de la organización de las partes, etc.

En cuanto a la topología, no será tratada con detalle en este trabajo, lo que no quiere decir que carezca de importancia en el campo de la ontología formal, ni en las matemáticas ni en el estudio de los sistemas complejos. Ya se ha visto cómo Baas hace referencia al estudio de las propiedades

topológicas de los compuestos químicos, así como de la creación de nuevos tipos topológicos. Incluso algunos autores hablan directamente de 'mereotopología' (Smith3) o de la complementación entre mereología y topología. (Varzi) Esto hace necesaria, al menos, una breve explicación acerca del objeto de este tipo de pensamiento.

Las propiedades que estudia la topología son aquéllas que son invariantes respecto de ciertos tipos de transformaciones que no afectan a la integridad del cuerpo a estudiar, como lo son las roturas y las uniones de cuerpos. Es decir, las propiedades topológicas de un cuerpo no se mantienen si lo dividimos en dos o si lo unimos a otro cuerpo. Dicho de otra manera: las transformaciones que no afectan a las propiedades topológicas son aquéllas que no afectan a la posibilidad de unir mediante una línea continua dos puntos cualesquiera del cuerpo, como podría ser estirar o encoger el cuerpo. (Smith1, 24-5) Por ejemplo, ser un cuerpo es una propiedad topológica en este sentido, así como las propiedades derivadas de poseer cavidades.

El estudio de los sistemas en general, como se ha visto, conlleva la elección de los objetos interesantes que los componen, así como de sus predicados (propiedades, relaciones y funtores) reseñables. Sin embargo, antes de esa elección se puede llevar a cabo otra aún más general: seleccionar los tipos de objetos (o más bien, de entidades) que pueden quedar ejemplificados en elementos del universo del sistema. Por ejemplo, según Aristóteles, puede haber varios tipos o formas de ser, llamados categorías. Éstas pueden ser sustancias, cualidades, cantidades, relativos, etc. Las sustancias se caracterizan por no necesitar a otra entidad para existir; las demás categorías son lo que se denomina 'accidentes', los cuales necesitan otra entidad para existir, en concreto, una sustancia (en efecto, no puede haber una cualidad que no sea cualidad-de-algo, y ese algo es una sustancia). Así, antes que ser olmo, tigre o nube, las cosas son o sustancias o algún tipo de accidente.

Este tipo de distinciones, ya de por sí filosóficamente interesantes, pueden contribuir a resolver numerosos problemas. Por ejemplo, se puede examinar el caso de las aplicaciones que Barry Smith hace de la ontología formal sobre ontologías computacionales en biomedicina. En primer lugar se ha de distinguir entre ambos tipos de ontología.

Una ontología computacional o de aplicación consiste en un sistema de software que estructura datos de acuerdo con una jerarquía de clases, con el objetivo de manipular información y permitir la interoperabilidad entre sistemas.

Por su parte, una ontología filosófica es un sistema de representaciones de elementos de la realidad según una jerarquía, pergeñada con el fin de comprender y relacionar los elementos entre sí. (Simon y Smith, 1)

La investigación de Smith se enmarca en los proyectos promovidos por el IFOMIS (Institute for Formal Ontology and Medical Information Science) cuyo objetivo es “to advance research in ontology in the domain of medical information science and, more generally, to show how the expertise of philosophers and logicians can be beneficially applied in the field of biomedicine”.<sup>23</sup> En el campo de la biomedicina se manejan miles de términos técnicos interrelacionados entre sí de maneras intrincadas, por lo que se han llevado a cabo varios intentos<sup>24</sup> de elaborar clasificaciones sistemáticas de esos conocimientos y sus relaciones.

Estos intentos se ven aquejados principalmente por dos problemas: el de la interoperabilidad y el de la elección de los criterios. El primero resulta evidente al echar un vistazo a la larga lista de ontologías biomédicas: cada base de datos utiliza su lenguaje, pero sus términos están relacionados, ¿cómo relacionar una ontología con otra pese a las disparidades lingüísticas? El segundo problema está en relación con el primero: ¿qué criterio de clasificación elegir?

A este respecto, la filosofía puede ser aplicada de al menos dos maneras (Simon y Smith, 4):

1. Como una herramienta de análisis para descubrir inconsistencias mediante experimentos mentales, así como para proveer los conceptos para su posterior reparación
2. Formalización de la ontología mediante el uso de la lógica de primer orden, a través de conceptos, relaciones y axiomas

Antes de pasar a examinar un caso práctico de aplicación filosófica a una ontología biomédica, es necesario describir los conceptos ontológicos básicos que Smith propone, es decir, los criterios más generales a partir de los cuales se clasificarán los objetos. Existen cuatro conceptos y tres relaciones: (Simon y Smith, 5; Smith<sup>2</sup>, 78-81; Bittner y Smith)

Desde un punto de vista mereológico:

- Universales: un universal es lo que los objetos que son englobados bajo un concepto tienen en común. Son algo real (que existe en el mundo espacio-temporal) consistente en la suma mereológica (la suma de las partes) que tiene en común un grupo

---

<sup>23</sup> <http://www.uni-saarland.de/institut/ifomis/history.html>

<sup>24</sup> Por ejemplo: Cell Ontology (CL), Environment Ontology (EnvO), Foundational Model of Anatomy (FMA), Functional Genomics Investigation Ontology (FUGO), GALEN, Gene Ontology (GO), HL7 Reference Information Model (RIM), International Classification of Functions and Disabilities (ICF), LinkBase, National Cancer Institute Thesaurus (NCIT), Ontology for Biomedical Investigations (OBI), Phenotypic Quality Ontology (PaTO), Plant Ontology (PO), Protein Ontology (PRO), Relation Ontology (RO), RNA Ontology (RnaO), Sequence Ontology (SO), SNOMED CT, Upper Biomedical Ontology (OBO-UBO), ACGT Master Ontology (ACGT MO), WordNet.

de individuos. Por ejemplo, el universal 'equino' será la suma de las partes anatómicas que tienen en común este tipo de animales: dientes de corona alta, un único dedo en cada pata, etc.

- Particulares: son las entidades concretas. Por ejemplo, esta mesa, esa persona, la Tierra, etc.

Desde un punto de vista temporal:

- Endurantes (*endurants*): son las entidades que se dan de una vez por todas en cada instante temporal. Coinciden en general con el sentido intuitivo de objeto: sillas, mesas, animales, etc.
- Perdurantes (*perdurants*): entidades que tienen partes temporales que se dan sucesivamente. Se asemejan a lo designado por 'proceso'. Por ejemplo: una cirugía, un ataque al corazón, una melodía...

Relaciones básicas:

- Instanciación: una instancia de un universal es un particular que ejemplifica el conjunto de partes (propiedades, configuraciones, etc.) que el universal recoge. No todo particular es instancia de un universal (o al menos no de uno con interés científico). Por ejemplo, la suma mereológica de mi rodilla izquierda y el mosquito que pasa volando frente a mí es un caso de particular sin universal, o *junk particular*. (Smith2, 79)
- Ser-un: A es un B si y sólo si
  - A y B son universales
  - Para todo tiempo t, si algo instancia A en t, entonces instancia B en t
  - Esta relación de instanciación es debida a una ley científica
- Ser-parte-de<sup>25</sup>: un universal A es parte de otro B cuando
  - Si una instancia de A existe en t, entonces una instancia de B existe en t
  - La primera es una parte, en el nivel de las instancias, de la segunda
  - Los A's no existen sino con B's como partes

---

<sup>25</sup> Se basa en la relación mereológica de 'parte' tal y como será explicada en 4.1.1

Presentados estos conceptos se puede pasar a enunciar caso práctico. El error en concreto se encontró en la ontología LinkBase<sup>®26</sup>. En ella, se clasificó la ausencia de una entidad como un tipo de entidad, de lo cual se derivaban inconsistencias. Por ejemplo, ‘el libro estaba ausente de mi apartamento’ y ‘el libro estaba ausente de mi habitación’ son dos ausencias, las cuales serían idénticas (ambas son la ausencia del mismo libro). Pero, según LinkBase<sup>®</sup>, todo ente tiene una frontera, y las ausencias, al ser un tipo de ente, también las tienen. También, se decía que las fronteras de dos objetos idénticos son las mismas. Sin embargo, las fronteras del objeto ausencia-del-libro-de-mi-habitación y de ausencia-del-libro-de-mi-apartamento no lo son (pues las fronteras de mi habitación y mi apartamento no son las mismas).

La solución pasa por simplificar, mediante los conceptos presentados, la definición de ausencia. Así, si se definen las ausencias mediante universales que no tienen instancias, el problema se disuelve. Por ejemplo, “no hay sangre en la orina” (o “hay ausencia de sangre en la orina”) significaría “no hay instancias del universal ‘sangre’ en la instancia del universal ‘orina’”. En el ejemplo del libro, la solución pasa por usar también la noción de ‘parte’: si no hay una instancia de “libro” en la instancia de “apartamento”, se infiere que no la hay en ninguna de las partes del apartamento.

A través de este ejemplo se pueden ver en acción las herramientas filosóficas que propone Smith para el desarrollo de ontologías computacionales: mediante un experimento mental (el hallazgo de un caso en el que la ontología falla) y la aplicación de una ontología formalizada, se puede contribuir a la resolución de problemas en ontologías de aplicación. Sin embargo, el papel de la filosofía no es meramente analítico sino también constructivo. Se enuncian ontologías para comprender y estudiar el mundo, y posteriormente, pueden ser utilizadas de diversas maneras.

#### 4. EL PAPEL DE LA MEREOLÓGÍA

Una parte del análisis filosófico que se ha venido realizando hasta ahora se ha centrado en una tarea que cabría denominarse como análisis conceptual. Mediante él se han puesto de relieve las principales nociones que entran en juego a la hora de tratar con la complejidad (emergencia, no linealidad, termodinámica, etc.), con el objetivo de ofrecer una visión sintética e introductoria. Además, en un punto de la exposición se ha presentado un intento de reducción conceptual, esto es, se ha tratado de englobar la multiplicidad de conceptos generales bajo unas etiquetas que pretenden denotar fenómenos fundamentales (multiplicidad, autorregulación, etc.) de los que

---

<sup>26</sup> Para conocer su funcionamiento, ver (van Gurp et al.)

dependen los demás. Además, se han introducido algunos temas y aplicaciones de la ontología formal, de la cual la mereología es una parte. Se ha procedido así con la intención de poner en relación todas las propuestas, así como de organizar los datos recogidos hasta ahora, pero quizá en torno a esta tarea también exista una meta algo más profunda. Por último, se han de recordar las menciones a las relaciones entre los todos y las partes, por ejemplo, cuando se afirmó que un agente poseía partes por el hecho de serlo.

El tratamiento de la relación entre las propiedades de los sistemas complejos observadas en los distintos autores, las aplicaciones de la ontología formal, y la posible teorización acerca de estos sistemas, tiene su lugar en este capítulo. Dicho tratamiento puede suscitar una serie de cuestiones relacionadas entre sí:

1. ¿Debe detenerse el análisis filosófico en el análisis conceptual? ¿No tiene más herramientas a su alcance?
2. La pretendida reducción conceptual, ¿ha de conformarse con ser una enumeración rapsódica de conceptos emparentados? ¿No puede adquirir un fundamento más estable?
3. ¿Existe alguna manera de expresar de manera formal la relación entre las partes, los todos y los todos y las partes? ¿Cómo se puede decir de un agente –un ente más bien abstracto– que tiene partes?

Es posible que la respuesta a estas preguntas resida en parte en el estudio de la mereología. A partir de ella se puede aventurar que no, que el análisis no tiene por qué detenerse en el punto en que termina el análisis de conceptos, ya que a través de esta disciplina se puede avanzar hacia una mayor profundidad ontológica. Asimismo se podrá mostrar que la reducción de unos conceptos a otros, así como la mencionada descripción de los agentes, puede sostenerse de manera más sólida aclarando la noción de sistema a través de la definición de los todos, las partes, y sus relaciones.

Para acometer estas tareas será necesario presentar alguna teoría sobre los todos y las partes, aclarando sus conceptos, fundamentos y teoremas. Una vez hecho esto, se podrá utilizar la herramienta recién adquirida para volver sobre los problemas presentados.

#### 4.1. Husserl y la tercera investigación lógica

Se podría definir la mereología de forma muy general como “la reflexión sobre los todos y las partes”. Husserl no utiliza este concepto como tal, pero en la tercera de sus “Investigaciones lógicas”, que tiene por título “Sobre la teoría de los todos y las partes”, se pueden encontrar gran cantidad conceptos que pueden servir de base para una indagación sobre el tema. En definitiva,

proporcionará algunos conceptos fundamentales y algunos teoremas derivados de ellos, los cuales permitirán definiciones precisas y versátiles.

Antes de comenzar se necesitan ciertas precisiones. La primera concierne al asunto de la objetividad de las distinciones. La de Husserl es una reflexión que aspira a ir más allá del fenómeno y quiere posicionarse como una fuente de distinciones objetivas. Conceptos como los de dependencia o separabilidad pueden ser utilizados como haciendo referencia a los actos de aprehensión y los contenidos fenomenológicos, pero también como refiriéndose simplemente al objeto y las partes del objeto, dando así lugar a una perspectiva objetiva sin referencia a la conciencia (Husserl, 394; Smith<sup>4</sup>, 38). Es en este segundo sentido en el que se tomarán todas las distinciones, ya que no se encuentra entre las metas del presente trabajo una discusión acerca de las dificultades de la fenomenología, sino que más bien se pretende construir un vocabulario útil que permita estudiar con más precisión los sistemas complejos.

#### 4.1.1. Los conceptos fundamentales

La primera y más básica distinción que se presenta es la que separa los objetos simples de los objetos compuestos. Los simples son aquéllos que no tienen partes. Por el contrario, los compuestos son los que poseen partes (Husserl, 387). En torno a la noción de parte existen numerosas distinciones.

En primer lugar, las partes pueden ser continuas o discontinuas: “La discontinuidad como tal se refiere a las diferencias específicas ínfimas de uno y el mismo género puro inmediatamente superior”, con la añadidura de que “se refiere a los momentos específicamente diferentes sólo en cuanto que éstos están «extendidos limitándose unos a otros» y dilatándose sobre un momento en continua variación, a saber, «el momento espacial o temporal.” (401) Es decir, que no basta con que las partes se distingan específicamente, sino también espacial o temporalmente. Un ejemplo del primer caso podrían ser dos cuerpos que ocupan lugares respectivos, no pudiendo ocupar el uno el espacio del otro. En el caso del tiempo, se podrían tomar como ejemplo dos sonidos que se suceden.

De las partes se dice, en segundo lugar, que se relacionan mediante enlaces (419-20). Si dos elementos  $a$  y  $b$  están en una relación mutua sin que para ello necesite intervenir otro elemento, se dirá que su enlace es inmediato. Si además  $b$  está relacionado con otro elemento  $c$ , pero éste último no lo está con  $a$ , se dirá que el enlace entre  $a$  y  $c$  es mediato. Desde otro punto de vista, el de la composición, se puede decir que los enlaces inmediatos son simples, ya que no contienen encadenamientos; sin embargo, los enlaces mediatos se pueden considerar compuestos de encadenamientos de enlaces simples (en el ejemplo, en enlace  $a-c$  contiene los enlaces  $a-b$  y  $b-c$ ), y

por ello pueden llamarse complejos.

En tercer lugar, se puede presentar una de las distinciones más importantes de la teoría de Husserl, la cual ejercerá de bisagra para articular otras tantas precisiones: la separación entre partes abstractas y concretas. Ésta consiste en “la división en pedazos —o partes en sentido estricto... y momentos o partes abstractas del todo. Llamamos pedazo a toda parte que es independiente relativamente a un todo T. Llamamos momento (parte abstracta) del mismo todo T a toda parte que es no-independiente relativamente a dicho todo. Y es aquí indiferente que el todo mismo sea independiente o no-independiente en absoluto o relativamente a otro todo superior. Según esto, partes abstractas pueden tener pedazos y pedazos pueden tener partes abstractas. Hablamos de pedazos de una duración, aun cuando ésta es algo abstracto; y también hablamos de pedazos de una extensión. Las formas de esos pedazos son partes abstractas inherentes a ellos.” (415) Se establece una correlación entre parte abstracta, momento y no-independencia por un lado; por el otro, se relacionan parte concreta, pedazo e independencia. Por tanto, es necesario aclarar el sentido de la independencia para poder aclarar el de las partes concretas y abstractas. Pueden encontrarse hasta cuatro definiciones de este concepto:

Definición 1: en una primera aproximación (388-9), las partes independientes son las de aquellos todos que se pueden desmembrar o despedazar (de ahí que a las partes concretas se las llame pedazos). Si por el contrario las partes se encuentran íntimamente ligadas, son no-independientes y están compenetradas. Como corolario, cabe añadir que las partes independientes pueden ser representadas separadamente de las demás, quedando intactas. No sucede esto con las partes no-independientes. Sin embargo, aunque esta definición pueda dar una idea general, aún dista de ser precisa: ¿en qué consiste el despedazamiento?, ¿qué es exactamente la compenetración?

Definición 2: un objeto es independiente si su esencia —su qué-es o definición— no se funda en la dependencia respecto de otro objeto. Este objeto es sin importar todos los demás, y aunque de hecho se den otros en relación con él, esto será contingente y no necesario. Los objetos no-independientes necesitan que otros objetos existan al mismo tiempo para poder existir ellos (394).

Definición 3: lo no independiente es lo que no puede existir por sí, sino como parte de un todo más amplio. En cambio, lo independiente puede formar parte de algún todo, pero no está obligado a ello (397).

Definición 4: un objeto independiente, considerado al margen de sus relaciones, puede decirse que es una parte que puede existir sin un todo, aunque analíticamente sea correcto decir también

que una parte no puede existir sin un todo del que sea parte (406).

En síntesis, se puede observar que lo que se entiende por objeto independiente es una parte concreta o pedazo que puede existir separadamente, fuera de un todo. De una parte abstracta o momento se dice que no puede existir separadamente.

Como precisión hay que añadir que se puede ser parte abstracta o concreta de forma absoluta o relativa (respecto de un todo más amplio). En el caso de los momentos o partes abstractas, se puede considerar que siempre son abstractas en sentido absoluto, pues siempre son abstractas respecto de cualquier todo más amplio considerado. En el caso de los pedazos o partes concretas, se pueden considerar relativos en relación con sus momentos abstractos, y se pueden considerar absolutos si no son abstractos en ninguna dirección (415-6). Estos matices pueden quedar aclarados mediante el siguiente ejemplo: si tenemos una melodía *x* y la consideramos en cierto nivel de abstracción, los sonidos sucesivos pueden considerarse absolutamente concretos, puesto que son separables e independientes, pero la intensidad del sonido es abstracta, puesto que no es separable de éste, depende de él para existir (o dicho de otra manera, no puede haber una intensidad sin un sonido). Si ahora consideramos esta melodía en un nivel de abstracción más alto, se podría decir que los sonidos no son sino partes relativamente concretas respecto del todo más amplio que es la propia melodía *x*, puesto que ésta no sería la que es si sus partes (sonidos concretos) no fueran los que son y en el orden en el que son, y esto hace que los unos dependan relativamente de los otros. En cambio, la intensidad del sonido sigue siendo una parte abstracta del sonido incluso en este nivel, y lo seguirá siendo en el nivel del movimiento, la sinfonía, etc. En todo caso, los vocablos “concreto” y “abstracto” pueden resultar confusos, y parece ser preferible utilizar siempre en su lugar los sinónimos “pedazo” y “momento”.

Los pedazos pueden ser disyuntos en sentido estricto si es que no tienen ningún momento ni pedazo en común, o pueden serlo en sentido amplio si es que no tienen ningún pedazo pero sí un momento idéntico en común. Por ejemplo, si dos objetos separados aún tienen el género inmediatamente superior en común, como dos seres humanos, se podría decir que son disyuntos en sentido amplio. En sentido estricto podrían serlo un color y un concepto, que no parecen poseer ningún momento común. El fenómeno de la disyunción está en relación con la parte final del párrafo citado (415) en la que se afirma que los pedazos pueden tener partes abstractas y viceversa. Lo primero parece más o menos evidente, pero el hecho de que las partes abstractas puedan tener pedazos puede suscitar dudas si no se piensa en algo así como géneros que contienen bajo sí individuos o especies, o en propiedades que son compartidas por varios individuos o grupos de

individuos.

Al hilo de los pedazos y los momentos, Husserl propone la definición de “todo extensivo”. Un todo de este tipo es aquél que admite “un despedazamiento tal que los pedazos, por su esencia misma, sean del mismo género ínfimo que el determinado por el todo indiviso” (416).

Una de las consecuencias clave de la distinción entre pedazos y momentos, es que se evita el tener que pensar que toda parte es parte física, o al menos, parte concreta. Este tipo de pensamiento se encuentra ya en Aristóteles, que al examinar uno de los sentidos de la relación “estar-en” considera que un accidente puede estar en una sustancia como una parte en un todo (Smith4, 17-8). Por ejemplo, la cualidad verde de una hoja es una parte del todo “hoja”, y no sólo lo son sus células, savia, etc. Esta posibilidad aumenta el poder descriptivo de la teoría, al poderse considerar las propiedades como partes del todo del que son propiedades, de modo que quepa poner de manifiesto la relación entre éstas y la estructura del todo.

En cuarto y último lugar: a partir de las nociones de independencia y no-independencia se pueden definir las relaciones de fundamentación. Un elemento  $a$  fundamenta a otro  $b$  cuando el segundo no puede existir si no se da el primero. Además, cuando  $a$  y sólo  $a$  provee esta fundamentación a  $b$ , se dice que  $b$  está fundamentado *exclusivamente* por  $a$  (Husserl, 411). Estas relaciones de fundamentación pueden ser a su vez bilaterales o unilaterales. Dos elementos se fundamentan bilateralmente cuando la fundamentación es mutua, es decir, cuando el uno no puede darse sin el otro y viceversa. En cambio, cuando la relación es unilateral, uno de los dos elementos fundamenta al otro, pero este otro es indiferente para el primero: el elemento fundamentador es independiente del fundamentado (414).

Juntando los conceptos de enlace mediato e inmediato con el de fundamentación, se obtienen los de fundamentación mediata e inmediata. Si se imaginan unas relaciones como las siguientes:  $a$  fundamenta a  $b$ ,  $b$  fundamenta a  $c$ , se puede decir que la fundamentación  $a-b$  y la  $b-c$ , son inmediatas, pero la  $a-c$ , lo es mediata (414).

Resulta sumamente interesante, por último, que el concepto de fundamentación pueda servir para definir más rigurosamente el concepto de todo (421-2):

“Por todo entendemos un conjunto de contenidos, que están envueltos en una fundamentación unitaria y sin auxilio de otros contenidos. Los contenidos de semejante conjunto se llaman partes. Los términos de fundamentación unitaria significan que todo contenido está, por fundamentación, en conexión directa o indirecta con todo otro contenido.”

#### 4.1.2. Los seis teoremas

Husserl trata de describir, mediante un conjunto de seis teoremas, las mencionadas relaciones de fundamentación. Estos teoremas son los siguientes:

“Teorema 1. Si un  $a$ , como tal, necesita ser fundado por un  $m$ , entonces un todo que tenga como parte un  $a$ , pero no un  $m$ , necesitará igualmente de la misma fundamentación.” (412)

“Teorema 2. Un todo que comprenda como parte un momento no-independiente, sin comprender, empero, la complementación exigida por dicho momento, es también no-independiente; y lo es relativamente a los todos independientes superiores, en los cuales aquel momento no-independiente esté contenido.” (412)

“Teorema 3. Si  $T$  es una parte independiente de [esto es, relativamente a]  $T'$ , entonces toda parte independiente  $t$  de  $T$  será también parte independiente de  $T'$ .” (412)

O dicho de forma breve: “La parte independiente de una parte independiente es parte independiente del todo.” (412)

“Teorema 4. Si  $p$  es parte no-independiente del todo  $T$ , será también parte no-independiente de cualquier otro todo, del cual sea  $T$  parte.” (412)

“Teorema 5. Un objeto relativamente no-independiente es también absolutamente no-independiente. En cambio, un objeto relativamente independiente puede ser no-independiente en sentido absoluto.” (413)

“Teorema 6. Si  $a$  y  $b$  son partes independientes de un todo  $T$ , serán también independientes relativamente una de otra.” (413)

Las demostraciones de los teoremas se omiten aquí, pues sólo se muestran éstos a título informativo, en primer lugar, de las propiedades básicas de la fundamentación, y en segundo lugar, como demostración de que esta teoría mereológica puede ser –o al menos puede intentar ser– formalizada. Resulta del todo interesante conocer las propiedades básicas de esta relación porque es ella la que permite definir la unidad de un todo, y además, junto con las nociones de momento, pedazo y enlace hace posible hablar de todos y partes de forma razonablemente precisa, pues ya se tienen los dos ingredientes básicos para hacerlo: se puede decir qué es un todo, de qué puede estar compuesto y cómo se forma su estructura.

#### 4.2. Vuelta a los sistemas complejos

La aplicación más inmediata y clara de la mereología, respecto de las preguntas que se

formularon al inicio de este capítulo, es la de la aclaración de la noción de agente. Se dijo en (2.2.4) que un agente, aun considerado aisladamente, tenía partes, y que éstas eran principalmente los sensores, los efectores, las reglas y el entorno. Si pensamos en la noción común de parte, que suele coincidir con el recién adquirido concepto de pedazo, decir que las reglas son una parte del agente resulta una expresión algo extraña. Pero si se piensa en el agente como un todo, que tiene pedazos y momentos, el análisis puede avanzar de forma más fluida.

En primer lugar, si diseccionamos el *todo-agente*, se puede considerar el *núcleo* del agente como un momento. Este *núcleo* es la parte que lleva a cabo las acciones (la hormiga, el leucocito, la neurona, etc.), y que en el habla corriente sería nombrado como *agente* sin más. El otro momento que completa el *todo-agente* es el *entorno* –que analizado a un nivel más detallado, sería un conjunto de objetos y otros agentes con los que el agente interactúa. Entre ambos momentos, que lo son por ser dependientes del *todo-agente*, se da una relación de fundamentación, seguramente bilateral: no puede haber agente sin entorno, y no puede haber entorno sin agente. Esto puede justificarse diciendo que el agente lo es porque actúa sobre algo, y el entorno es aquello sobre lo que actúa.

Si, en segundo lugar, el análisis se lleva a un nivel más profundo, se observará que el *núcleo* del agente tiene, a su vez, varios momentos, que son los que componen lo que en (2.2.1) se llamó sistema de desempeño. Estos momentos son las *reglas* y el conjunto *receptores-efectores*. De nuevo tenemos una relación de dependencia, no ya sólo de estos elementos respecto del *todo-agente*, sino también entre ellos. Esto sucede así porque la propia estructura de receptor-efector es la que determina la sintaxis de las *reglas*, que mediante una forma condicional operan así: “si mensaje-receptor entonces respuesta-efector”. De modo que se puede afirmar que existe una relación de dependencia unilateral, en la que la forma de las reglas depende de la estructura receptor-efector<sup>27</sup>.

Se ha de precisar que si el *todo-agente* se considera dentro de un todo más amplio, como el de los objetos físicos, sus relaciones de dependencia pueden relativizarse: tanto lo que se ha llamado *núcleo* como el *entorno* se podrían considerar pedazos, quizá no disyuntos por seguir compartiendo el momento de pertenencia al *todo-agente*, pero sí separables y más relativamente independientes en lo que se refiere al movimiento y las interacciones físicas –aunque quizá no en lo referente a la existencia, ya que ambos se mantienen entre sí, como se ha visto, merced a un intercambio de energía.

---

<sup>27</sup> Puede que la relación no sea bilateral, porque si se diera otra estructura de relación con el medio distinta a la de receptor-efector, las reglas podrían mantener la misma sintaxis.

Además de al análisis del concepto de agente, se ha dicho que la mereología puede resultar útil a la hora de sustentar la pretendida reducción ontológica entre las distintas características de los sistemas complejos. El análisis, en líneas generales, puede presentarse como sigue:

**Multiplicidad:** un sistema es un objeto compuesto, es decir, tiene partes. En un nivel general, estas partes podrían considerarse así: las concretas son los agentes y las abstractas son las propiedades sistémicas o emergentes. En un nivel más detallado, como se ha visto, los agentes tienen varias partes, e incluso el resto de agentes interviene en la definición de un agente como tal, pues forman parte de su entorno.

El comportamiento grupal tiene su contrapartida mereológica en los enlaces que las partes concretas establecen entre sí. Estos enlaces, independientemente de que sean mediatos, inmediatos, complejos o simples (presumiblemente los habrá de todos los tipos), vendrán definidos por las reglas que rigen a los agentes. Es decir, que los enlaces no son fantasmas abstractos que velan por la unidad del sistema, sino más bien, al menos en el caso de estos sistemas dinámicos, son pautas de conducta que producen relaciones de interacción estables entre dos o más elementos, aunque quizá en algunos casos los enlaces tengan relación con una parte concreta del sistema (por ejemplo, vasos sanguíneos, sinapsis, etc.).

**Autorregulación:** más que una única propiedad, es el conjunto de propiedades y capacidades emergentes que hacen que el sistema pueda responder a las interferencias del entorno. Estas propiedades, como se ha dicho arriba, se corresponden con los momentos del todo. Esto quiere decir que son partes no-independientes de éste, o dicho de otra manera, dependen de él para existir, y como el todo, en su aspecto concreto, está compuesto de los agentes y sus enlaces, se puede decir que los momentos dependen de la organización del todo. Este fenómeno se expresó en el capítulo anterior diciendo que las interacciones entre agentes dan lugar a patrones emergentes.

El carácter abierto o cerrado del sistema puede describirse mereológicamente a través de las relaciones de fundamentación. De nuevo se requiere, como en el caso de los agentes, ascender hasta el nivel de los objetos físicos, en el que los todos analizados se contemplen como sistemas físicos. Desde esta perspectiva, los sistemas abiertos se distinguen de los cerrados en una mayor inmediatez respecto de sus relaciones de fundamentación para con el entorno. En efecto, gran parte de su actividad, si no toda, está dirigida a la autoconstrucción –o autopoiesis– mediante relaciones de intercambio de materia, energía e información con el medio. Sin esta interacción directa y constante con el medio el sistema no existiría. En cuanto a los sistemas cerrados, es cierto que también estos dependen del medio en cuanto a su existencia material, pero su interacción con el medio está

dirigida al mantenimiento del equilibrio y no a la autoconstrucción. En el caso de sistemas cerrados artificiales, el mantenimiento será realizado por el ser humano; en el caso de sistemas cerrados incrustados en el seno de un sistema abierto, son los mecanismos de autopoiesis de éste los que le proveen de su sustento material. En cualquiera de los dos casos, su dependencia del medio es relativamente de una mayor mediatez respecto de la de un sistema abierto.

En síntesis, se tiene que un sistema complejo es un todo, en el que los pedazos son los agentes (que a su vez tienen varias partes) y los momentos son las llamadas propiedades emergentes. Esto quiere decir que estas propiedades mantienen una fuerte relación de dependencia respecto de la organización concreta del todo al que pertenecen, la cual está definida por los enlaces entre los pedazos. Es importante notar que estos enlaces y propiedades emergentes tienen como elemento originario principal la acción, la interacción y el cambio, es decir, elementos que dependen de la temporalidad. Además, los momentos del todo constituyen propiedades y capacidades que, en muchos casos, afectan a la integridad del propio todo, en lo que se ha llamado “causación descendente” (Campbell, 236-45).

Las dos últimas precisiones son importantes en la medida en que marcan la diferencia entre lo que Bertalanffy llama sistemas conceptuales y reales:

- Los sistemas reales son “entidades percibidas en la observación o inferidas de ésta, y que existen independientemente del observador.”
- Los sistemas conceptuales “son ante todo construcciones simbólicas, con sistemas abstraídos (ciencia) como subclase de las últimas, es decir, sistemas conceptuales correspondientes a la realidad.” (Bertalanffy, XV)

Un sistema conceptual, como podría ser la geometría euclídea, permite construir sistemas que tienen propiedades emergentes. Por ejemplo, “la suma de sus ángulos es igual a  $180^\circ$ ” es una propiedad que se puede predicar del triángulo, pero no de cada una de las rectas que lo definen. El hecho de que un sistema conceptual posea este tipo de propiedades parece acercarlo de alguna manera a los sistemas complejos; sin embargo, al carecer de dinamismo, no se darán en él la autorregulación ni los fenómenos que van asociados a ella, de modo que el parentesco termina aquí.

La distinción entre sistemas conceptuales y reales parece útil entonces para especificar que no cualquier sistema con propiedades emergentes es candidato a sistema complejo, sino sólo aquéllos cuyas propiedades permiten la autorregulación a través de causación descendente. Sin embargo, se puede objetar que los sistemas reales también tienen parte de conceptuales, puesto que cierto

sentido están constituidos por abstracciones, de modo que conviene sustituir el par real/conceptual por alguno del estilo de dinámico/no-dinámico (o adinámico o incluso estático), que evita este tipo de problemas y además pone de relieve el importante papel que tiene el tiempo en los sistemas complejos.

Mediante los conceptos de la mereología se han podido entonces expresar las características principales de los sistemas complejos. Estos conceptos y sus relaciones, como se ha visto a través de los seis teoremas, son susceptibles de ser expresados con rigor en lenguaje natural, y a priori parece que nada impide que sean, aumentando el nivel de abstracción, formalizados en un lenguaje simbólico. De esta manera, si se pudiera expresar simbólicamente el comportamiento de un sistema partiendo de sus elementos más simples, se podría acercar el análisis filosófico de la complejidad a algunos lugares conectados con el estudio de los sistemas complejos, como por ejemplo, la programación de modelos computacionales, la formulación de ontologías o el establecimiento de principios generales.

En relación con el lenguaje simbólico y el establecimiento de principios generales se encuentra el problema de la formulación de una teoría de los sistemas complejos. Mitchell plantea el problema así:

“there are many general principles that are not very useful, for example, “all complex systems exhibit emergent properties,” because [...] they “provide names for what we can’t explain.” [...] no single set of useful principles is going to apply to all complex systems. It might be better to scale back and talk of common rather than general principles: those that provide new insight into—or new conceptualizations of—the workings of a set of systems or phenomena that would be very difficult to glean by studying these systems or phenomena separately, and trying to make analogies after the fact. The discovery of common principles might be part of a feedback cycle in complexity research: knowledge about specific complex systems is synthesized into common principles, which then provide new ideas for understanding the specific systems. The specific details and common principles inform, constrain, and enrich one another.” (Mitchell, 294)

Es decir, que limitarse a enunciar características generales de los sistemas complejos no resulta fructuoso, sino que si se pretende avanzar en su comprensión hay que tratar de estudiar fenómenos concretos, describirlos e intentar de extender los principios hallados a otros fenómenos (quizá de forma similar a lo que propone Bertalanffy respecto del isomorfismo).

Puede que esta manera de proceder forme parte del camino a seguir, pero la de Holland parece una propuesta más ambiciosa: el fin de la investigación han de ser los principios generales

de los SCA. Su enunciación pasa por las matemáticas: “[l]as matemáticas desempeñan un papel crítico, debido a que nos permiten formular rigurosas generalizaciones o principios. [...] Un modelo matemático bien diseñado [...] generaliza las particularidades reveladas por los experimentos físicos, por los de computadora y por las comparaciones interdisciplinarias. Además, las herramientas de las matemáticas proporcionan rigurosas derivaciones y predicciones aplicables a todos los SCA.” (Holland, 173) Holland ve en la potencia descriptiva de un lenguaje formal como las matemáticas la clave para enunciar los principios con suficiente generalidad. Estos principios generales no son aquéllos que critica Mitchell, sino precisamente los de tipo contrario: los que pretenden describir las causas comunes que dan lugar a las características de los sistemas complejos, y no los que se contentan con enunciar dichas características. Es posible que, por su forma de ser, el lenguaje mereológico pueda tener un papel en la enunciación de estos principios. Y es que si en algo parecen estar de acuerdo Mitchell y Holland es en que hace falta un nuevo léxico que permita hablar claramente de los sistemas complejos.

En referencia a los modelos computacionales y las ontologías, y haciendo alusión a las herramientas y casos de aplicación práctica que se han presentado a lo largo de los capítulos 3 y 4, se puede presentar de manera algo más explícita la relación entre computación y sistemas complejos. Es posible que a estas alturas haya ganado fuerza la idea de que la ontología formal en general y la mereología en particular, por su forma de ser, podrían jugar un papel interesante no sólo en el estudio de sistemas en general, sino de sistemas complejos en particular. Esto es así porque la estructura conceptual que describe todos y partes encaja muy bien con la peculiar organización de este tipo de sistemas, en la que hay agentes interconectados y patrones emergentes que dependen de ellos.

Uno de los campos de la computación que está en directa conexión con este tipo de organización es el de las arquitecturas de agentes (Corchado, 29-64). El modelo de Holland que se ha expuesto es un ejemplo de este tipo de arquitectura, pero existe una gran variedad de ellas. Este tipo de programación consiste en la puesta en marcha de un conjunto de agentes que realizan tareas complejas a través de reglas simples interconectadas. Tiene muchas aplicaciones en la resolución de problemas, pero también resulta muy interesante, como se ha visto, para el estudio de los sistemas complejos.

Una de las tareas iniciales al diseñar una arquitectura de este tipo es la de reflexionar acerca del tipo de agentes que se necesitan: si han de funcionar sobre la base de un conocimiento simbólico del mundo, si han de ser menos reflexivos y más reactivos, o una mezcla de ambos. Para llevar a

cabo esta tarea, es necesario hacer explícita la noción de agente, sus partes, las diferentes maneras en que se puede implementar su forma de ser, etc. Una vez hecho esto, se ha de pensar la forma en que los agentes se comunican entre sí y con el entorno, normalmente haciendo uso de un lenguaje simbólico interpretado llamado *ontología* (se trata de ontología en sentido computacional, pero tras lo visto en 3.3.2, quizá no sería difícil explicitar su relación con la ontología filosófica).

Utilizando como apoyo el esquema según el cual se da una relación lógica —y no siempre cronológica— entre una ontología, la descripción de un sistema, la enunciación de una teoría y la aplicación de ésta a un modelo, se presenta este esquema que pretende incluir la ontología en general y la mereología en particular en un marco más amplio de estudio de los sistemas complejos:

1. Ontología: ofrece el lenguaje básico que se va a utilizar para hablar acerca de cierta región de la realidad. Dicho lenguaje tiene un origen filosófico y se aplica sucesivamente en modelos y computación:
  - a. Filosofía: utiliza las categorías ontológicas, mereológicas, de dependencia, etc. para establecer una división general de los entes y sus relaciones
  - b. Teoría de modelos: podría verse como la aplicación de estas categorías básicas, a través de procedimientos sólidamente fundamentados, a una porción de la realidad, definiendo así el sistema
  - c. Informática: se encarga de la implementación computacional de los resultados con vistas a la modelización
2. Modelización: en esta fase las variables son sustituidas por las partes y funciones concretas del sistema, es decir, se introducen los comportamientos de los elementos a través de reglas, ecuaciones, etc.:
  - a. Programación: se trata de la descripción algorítmica de las partes y su funcionamiento
  - b. Simulaciones: consiste en observar el comportamiento una vez que toda la maquinaria se ha puesto en marcha. Puede permitir quizá realizar predicciones y comenzar a extraer patrones generales de comportamiento de una forma sistemática. Estas tareas parecen esenciales a la hora de encontrar principios generales, lo cual, como se ha dicho, es una de las tareas pendientes en el estudio de la complejidad.

Se han presentado, en suma, algunas tareas y posibles proyectos, así como varias herramientas

que podrían ayudar en su realización, todo lo cual se deriva de una reflexión filosófica acerca de los sistemas y los agentes (los todos y las partes). Si algunas de estas tareas son realizables, y si las herramientas se muestran fecundas, la respuesta a la primera pregunta que se enunció al comienzo del capítulo podría completarse de esta forma: no, el análisis filosófico no tiene por qué detenerse en el análisis de los conceptos generales, ya que tiene instrumentos a su alcance con los que puede acercarse a los fundamentos de los sistemas complejos y, además, ofrecer resultados que le permitan la comunicación directa con otras disciplinas envueltas en el estudio de estos sistemas.

## 5. CONCLUSIONES

- 1 .- El análisis conceptual resulta de utilidad a la hora de realizar una introducción al mundo de la complejidad, pues permite apreciar los temas fundamentales que aparecen de forma recurrente en los distintos autores. Estos temas son: autorregulación, comportamiento grupal, emergencia, no linealidad, adaptación y apertura.
- 2 .- Sin embargo, este análisis conceptual también ha servido para poner de relieve algunos de los problemas que afectan a este campo de estudio, y cuyo tratamiento puede resultar una interesante tarea para la filosofía. Los problemas principales son tres:
  - 2.1 .- Se observa una notable falta de unidad en los conceptos. La relación entre ellos siempre va más allá de la mera expresión verbal, pero aun así existen diferencias profundas en el contenido de algunos conceptos. Un caso claro parece ser el de la apertura: mientras que los enfoques más influidos por la física tratan la apertura de forma general como la capacidad de ser influido por el entorno, las visiones cercanas a la biología analizan el concepto de manera más profunda, poniendo el acento en un ingrediente que apenas se había mencionado –la autoconstrucción. Sería necesario el estudio de los acuerdos y desacuerdos entre ambas perspectivas.
  - 2.2 .- Otra de las carencias que presenta el campo de la complejidad es la ausencia de unos principios generales. Los autores dedicados al tema son conscientes de ello y suelen marcar como una de las metas del campo de la complejidad el hallazgo de tales principios.
  - 2.3 .- Un problema derivado de los dos anteriores es el de la demarcación. Sin unidad de conceptos y sin unos principios generales la tarea de una demarcación más o menos rigurosa del campo de la complejidad se dificulta, pues parece que más allá de disciplinas relacionadas y problemas semejantes no hay nada que permita discernir de forma

estricta lo complejo de lo no complejo.

3.- Se ha concluido que el análisis filosófico no tiene por qué detenerse al nivel del llamado análisis conceptual, proponiéndose la mereología como una de las posibles herramientas que permiten la extensión de dicho análisis. Esto es así porque la mereología puede contribuir al estudio más profundo de las relaciones ontológicas que se presentan entre las realidades designadas por los conceptos. Algunas de las aportaciones que este tipo de estudio puede ofrecer son las siguientes:

3.1.- Un lenguaje mediante el cual se puedan formalizar las nociones de agente y sistema. Esto se puede llevar a cabo a través del uso de conceptos estrictamente definidos, y en un posterior trabajo de abstracción mediante un lenguaje simbólico.

3.2.- Sintetizar los conceptos fundamentales que parecen poblar el campo de la complejidad, al menos de dos maneras. Primero, aclarando los principios ontológicos fundamentales que subyacen a los distintos fenómenos. Segundo, llevando a cabo algún tipo de reducción ontológica como la que se ha presentado en este escrito, y de esta manera estableciendo las relaciones internas entre las características de los fenómenos complejos.

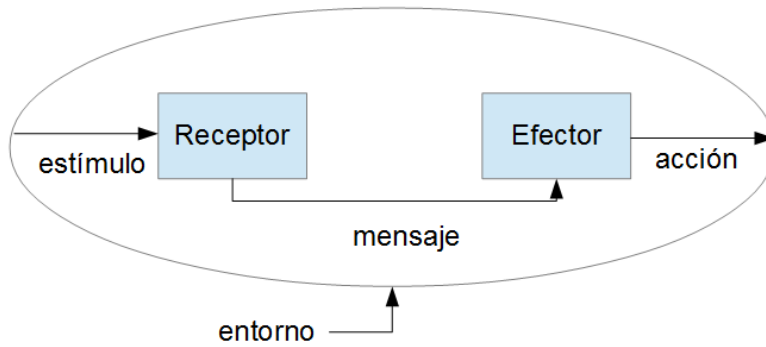
3.3.- A partir de esta síntesis ontológica se podría proponer un criterio de demarcación, pues las propiedades ontológicas básicas pueden ayudar a definir positivamente lo complejo, y por tanto a separarlo de lo que no lo es.

3.4.- Abrir una puerta de comunicación entre la filosofía y otras disciplinas a través del análisis de la complejidad. Se ha visto que la posibilidad de formalizar las nociones de agente y sistema entronca con algunos estudios relacionados con la computación, como la arquitectura de agentes. De esta manera se puede relacionar el trabajo filosófico con distintas tareas de simulación e investigación.

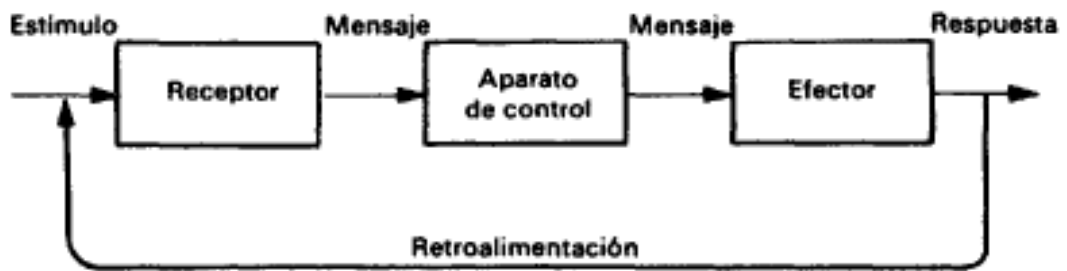
4.- Partiendo de los frutos del análisis conceptual y mereológico, se podría avanzar en la creación de un lenguaje común para la complejidad. Un lenguaje tal se podría considerar uno de los pasos necesarios en la formulación de los necesarios principios generales.

## 6. APÉNDICE: ESQUEMAS Y FIGURAS

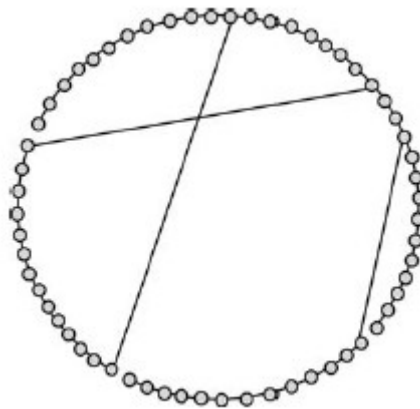
6.1. Figura 2.2.1



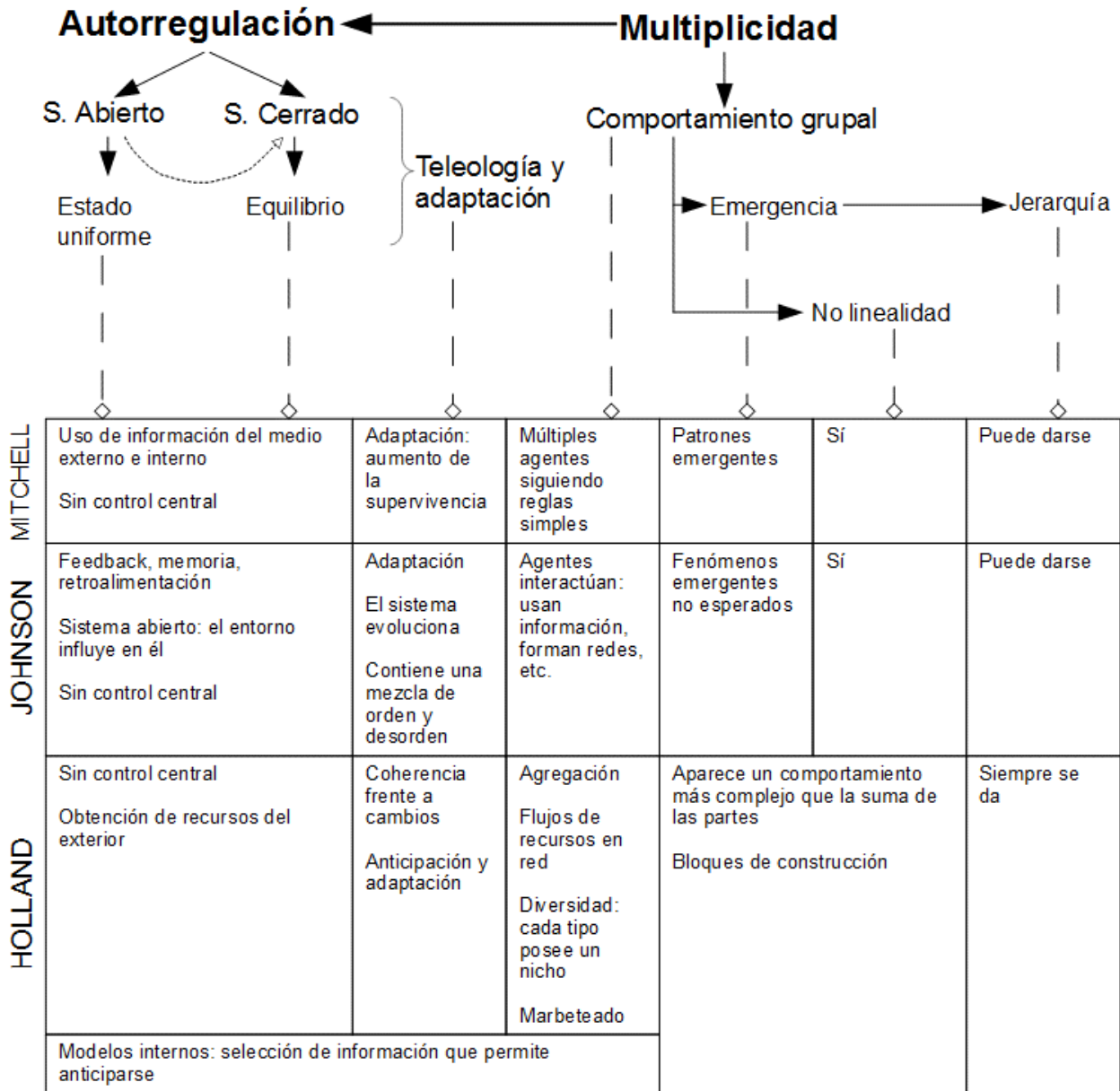
6.2. Figura 2.2.4



6.3. Figura 2.3.1



6.4. Esquema 2.2.5



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Abelson, Harold y Sussman, Gerald Jay (**Abelson y Sussman**), “Structure and interpretation of computer programs”, Cambridge, The MIT Press, 1996
- Ayala, Francisco J.; Dobzhansky, Theodosius, “Estudios sobre filosofía de la biología”, Barcelona, Ariel, 1983
  - Capítulo 11: **Campbell**, Donald T., “La causación descendente en los sistemas biológicos jerárquicamente organizados”
- Baas, Nils:
  - **(Baas1)**: “Emergence, hierarchies and hyperstructures”, en “Artificial Life III”, 1994, pp. 515-536
  - **(Baas2)**: “New structures in complex systems” en “European Physical Journal. Special Topics” 178, 25–44 (2009)
- Benítez, Antonio:
  - **(Benítez1)**: “Fundamentos de inteligencia artificial. Libro tercero: inteligencia artificial bioinspirada”, Madrid, Escolar y Mayo, 2013
  - **(Benítez2)**: “Lógica”, Madrid, Escolar y Mato, 2013
- **Bertalanffy**, Ludwing, “Teoría general de los sistemas”, Buenos Aires, Fondo de Cultura Económica, 2007
- Bittner, Thomas y Smith, Barry (**Bittner y Smith**): “Normalizing medical ontologies using basic formal ontology”, en Kooperative Versorgung, Vernetzte Forschung, Ubiquitäre Information (Proceedings of GMDS Innsbruck, 26-30 September 2004), Niebüll: Videel OHG, 199–201
- Bogg, Jan; Geyer, Robert (editors), “Complexity, Science and Society”, Oxford, Radcliffe Publishing, 2007
  - Capítulo 8: **Heylighen**, Francis; Cilliers, Paul; Gershenson, Carlos, “Complexity and Philosophy”, versión electrónica de <<http://pespmc1.vub.ac.be/papers/Philosophy-Complexity.pdf>>
- Clayton, Philip; Davies, Paul (eds.), “The re-emergence of emergence. The emergentist hypothesis from science to religion”, Nueva York, Oxford University Press, 2006

- Capítulo 11: **Chalmers**, David, “Strong and weak emergence”
- **Holland**, John, “El orden oculto. De cómo la adaptación crea la complejidad”, México D.F., Fondo de Cultura Económica, 2004
- **Husserl**, Edmund, “Investigaciones lógicas. Volumen II”, Madrid, Alianza, 1999
- **Johnson**, Neil, “Simply complexity. A clear guide to complexity theory”, Oxford, Oneworld, 2009
- **Ladyman**, James; Lambert, James; Wiesner, Karoline, “What is a complex system?”, 2011, versión electrónica de <http://philsci-archive.pitt.edu/8496/>
- Maldonado, Carlos Eduardo y Gómez Cruz, Nelson Alfonso:
  - **(Maldonado y Gómez1)**: “El mundo de las ciencias de la complejidad. Una investigación sobre qué son, su desarrollo y sus posibilidades”, Bogotá, Editorial Universidad del Rosario, 2011
  - **(Maldonado y Gómez2)**: “Modelamiento y simulación de sistemas complejos”, Bogotá, Editorial Universidad del Rosario, 2010
- Mas, Ana (coord.), “Agentes software y sistemas multiagente : conceptos, arquitecturas y aplicaciones”, Prentice Hall, 2005
  - Capítulo 2: **Corchado**, Juan Manuel, “Modelos y arquitecturas de agente”
- Maturana, Humberto; Varela, Francisco (**Maturana y Varela**), “De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo”, Buenos Aires, Lumen, 2003
- **Mitchell**, Melanie, “Complexity. A guide tour”, Oxford University Press, 2009
- **Prigogine**, Ilya, “El nacimiento del tiempo”, Buenos Aires, Tusquets, 2006
- Simon, Jonathan y Smith, Barry (**Simon y Smith**), “Using Philosophy to Improve the Coherence and Interoperability of Applications Ontologies: A Field Report on the Collaboration of IFOMIS and L&C”, en “Proceedings of First Workshop on Philosophy and Informatics Cologne, 31 March – 1 April 2004”, disponible en < <http://ceur-ws.org/Vol-112/>>
- Smith, Barry:
  - **(Smith1)**: “Basic concepts of formal ontology”, en N. Guarino (ed.), “Formal ontology in information systems”, 1998, IOS Press, pp.19-28

- **(Smith2)**: “Beyond concepts: ontology as reality representation”, en Varzi y Vieu (eds.), “Proceedings of FOIS 2004. International conference on formal ontology and information systems”
- **(Smith3)**: “Mereotopology: a theory of parts and boundaries”, en “Data and knowledge engineering”, 20 (1996), 287-303
- **(Smith4)**: Smith, Barry (ed.), “Parts and moments. Studies in logic and formal ontology”, Munich, Philosophia, 1982
- **Tarski**, Alfred, “Introduction to logic and to the methodology of the deductive sciences”, New York, Oxford University Press, 1994
- **van Gorp**, Maria, PhD; Decoene, Manuel, MD; Holvoet, Marnix; Casella dos Santos, Mariana, MD, “LinKBase®, a Philosophically-inspired Ontology for NLP/NLU Applications”, en KR-MED, “Bio-medical Ontology in Action”, November 8, 2006, Baltimore, Maryland, USA
- Casati, Smith y White (eds.), “Philosophy and the cognitive sciences. Proceedings of the 16th international Wittgenstein symposium”, Viena, Hölder-Pichler-Tempsky, 1994:
  - **Varzi**, Achille: “On the boundary between mereology and topology”, pp. 423-442