

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE FILOSOFÍA**



**TESIS DOCTORAL**

**Sistemas complejos y mereología**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

**Pablo López Mezo**

Directores

**Antonio Benítez López**  
**Emilio García Buendía**

**Madrid 2019**

---

# SISTEMAS COMPLEJOS Y MEREOLÓGÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
PRESENTADA POR

PABLO LÓPEZ MEZO

**Bajo la dirección de:**

Dr. Antonio Benítez López  
Dr. Emilio García Buendía

TESIS DOCTORAL

Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Filosofía

Madrid, 2018





# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>XI</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIII</b>
<b>Summary</b>	<b>XIX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>I Estudio de los sistemas complejos</b>	<b>5</b>
<b>2. Sistemas complejos</b>	<b>7</b>
2.1. Una definición previa . . . . .	7
2.2. Los orígenes de los sistemas complejos . . . . .	9
2.2.1. Sistemas autoorganizados . . . . .	10
2.2.2. Sistemas complejos adaptativos . . . . .	12
2.2.3. Condiciones de frontera . . . . .	13
2.2.4. Arquitectura de la complejidad . . . . .	14
2.2.5. Ciencia y complejidad . . . . .	16
2.2.6. Teoría general de los sistemas . . . . .	17
2.2.7. <i>Autopoiesis</i> . . . . .	22
2.3. Las propiedades de los sistemas complejos . . . . .	25
2.3.1. El modelo <i>Echo</i> . . . . .	26
2.3.2. Johnson y el <i>feedback</i> . . . . .	29
2.3.3. Holland y los sistemas complejos adaptables . . . . .	32
2.3.4. Kauffman . . . . .	34
<b>3. Puesta en común y crítica de la complejidad</b>	<b>41</b>
3.1. Un esquema ontológico básico . . . . .	41
3.2. Dos visiones, un tipo de sistema . . . . .	43
3.3. Los conceptos de los sistemas complejos . . . . .	44

3.4. Conclusiones: los problemas de la complejidad . . . . .	45
<b>II Estudio de los conceptos ontológicos</b>	<b>49</b>
<b>4. Mereología</b>	<b>51</b>
4.1. La tercera investigación de Husserl . . . . .	52
4.1.1. Consideraciones previas sobre la independencia y las leyes puras . . .	52
4.1.2. La fundamentación: sus teoremas y sus tipos . . . . .	56
4.1.3. Tipos de partes y todos . . . . .	58
4.2. Lesniewski . . . . .	61
4.2.1. Primeras intuiciones . . . . .	61
4.2.2. La axiomatización de la Mereología . . . . .	64
4.3. Leonard y Goodman . . . . .	72
4.4. Casati y Varzi . . . . .	74
4.5. Conclusiones . . . . .	79
<b>5. El concepto de fundamentación</b>	<b>81</b>
5.1. Especies, objetos y fundamentación . . . . .	82
5.2. Las simbolizaciones . . . . .	84
5.3. Conclusiones . . . . .	89
<b>6. Una ontología de niveles</b>	<b>91</b>
6.1. La noción <i>husserliana</i> de nivel . . . . .	91
6.2. La necesidad de los niveles . . . . .	92
6.3. Distintos acercamientos . . . . .	93
6.4. Conclusiones . . . . .	96
<b>7. Una propuesta ontológica</b>	<b>99</b>
7.1. Una teoría de la fundamentación . . . . .	99
7.1.1. Algunas carencias de la fundamentación . . . . .	99
7.1.2. Sobre las relaciones y su fuerza . . . . .	100
7.1.3. Grados de dependencia en función de las relaciones . . . . .	102
7.2. Una mereología . . . . .	104
7.2.1. Precisiones acerca de la extensionalidad y la mereología clásica . . .	105
7.2.2. Una mereología con partes abstractas . . . . .	106
7.3. Una teoría de niveles . . . . .	107
7.3.1. Una expresión simbólica de los niveles . . . . .	109
7.4. Conclusiones . . . . .	110

<b>III Estudio de la ontología de los sistemas complejos</b>	<b>113</b>
<b>8. La ontología de las propiedades de la complejidad</b>	<b>115</b>
8.1. Emergencia . . . . .	116
8.1.1. Emergencia y superveniencia . . . . .	116
8.1.2. La causación descendente . . . . .	118
8.1.3. La polisemia de la emergencia . . . . .	119
8.1.4. Los principales problemas de la emergencia y propuestas para su solución . . . . .	124
8.2. Dinamismo y autorregulación . . . . .	133
8.2.1. Dinamismo . . . . .	134
8.2.2. Autorregulación . . . . .	138
8.2.3. <i>Autopoiesis</i> . . . . .	141
8.3. Un formalismo de la complejidad . . . . .	143
8.3.1. Expresión simbólica de las propiedades de los sistemas complejos . .	144
8.3.2. Una definición de sistema . . . . .	152
8.3.3. Una definición de sistema complejo . . . . .	154
8.4. Conclusiones y observaciones finales . . . . .	161
<b>9. Estudio de los sistemas complejos: casos prácticos</b>	<b>163</b>
9.1. Un sistema sencillo . . . . .	163
9.2. Autorregulación relativa: sistemas de control . . . . .	166
9.3. Autorregulación fuerte: percepción del <i>quorum</i> . . . . .	171
9.4. Emergencia débil: autómatas celulares . . . . .	174
9.5. Emergencia fuerte: endosimbiosis . . . . .	178
9.6. Causación descendente: células de Bénard . . . . .	183
9.7. Sistemas complejos: hormigueros . . . . .	189
9.8. Conclusiones . . . . .	195
<b>10. Conclusiones finales</b>	<b>197</b>
10.1. Sobre el estudio preliminar de los sistemas complejos . . . . .	197
10.2. Sobre mereología y fundamentación . . . . .	197
10.3. Sobre los niveles . . . . .	198
10.4. Sobre la ontología de las propiedades de la complejidad . . . . .	199
10.5. Conclusiones finales a partir del análisis de sistemas . . . . .	200
<b>Bibliografía</b>	<b>201</b>
<b>Anexo: Las disciplinas científicas de la complejidad</b>	<b>207</b>
.1. Termodinámica y mecánica estadística . . . . .	207
.2. Teoría de la información . . . . .	211
.2.1. Información y entropía . . . . .	215



# Índice de figuras

2.1. Esquema de realimentación de Bertalanffy . . . . .	20
2.2. Sistema de transmisión de mensajes basado en reglas . . . . .	27
8.1. Esquema de sistemas dinámicos de Crutchfield . . . . .	135
8.2. Esquema del modelo Lotka-Volterra . . . . .	136
9.1. Esquema de un sistema de control de temperatura . . . . .	167
9.2. Esquema general de un sistema realimentado . . . . .	169
9.3. Evolución de un autómata celular . . . . .	176
9.4. Aspecto de las células de Bénard en una placa. . . . .	185
1. Esquema de Shannon y Weaver . . . . .	213



# Índice de cuadros

5.1. Comparación de los axiomas de F y WF . . . . .	85
7.1. Los principios de WGM1 . . . . .	111



# Agradecimientos

A mis directores, por su paciencia y sus enseñanzas.

A mis padres, a mi familia y a Tamara, por cuidarme.

Muchas gracias.



# Resumen

## Título de la tesis

SISTEMAS COMPLEJOS Y MEREOLÓGÍA.

## Introducción

El concepto de sistema complejo surge como una respuesta ante cierto tipo de problemas que aparecen a la hora de estudiar fenómenos cuyo comportamiento no se puede explicar de forma exclusiva a través del estudio de las partes. Desde un hormiguero hasta un atasco de tráfico, pasando por todos los entramados biológicos de un cuerpo animal, existen multitud de sistemas que, debido a una complicada interacción entre diversos tipos de partes, dan lugar a comportamientos globales inesperados en algún sentido.

Es por esto por lo que en los estudios sobre complejidad suele hacerse uso de conceptos como los de emergencia y autorregulación. Se dice que un sistema posee propiedades emergentes cuando éstas no son reducibles a los elementos de los niveles inferiores. Por su parte, un sistema autorregulado es aquél que puede dirigir su acción, modificando sus parámetros internos, sin necesidad de un control exterior o de un control centralizado.

Sin embargo, la manera de ser de estas características de la complejidad dista de estar clara, tanto a nivel científico como a nivel filosófico. Es necesario hacer explícito, en cuanto al concepto de emergencia, qué se quiere decir con irreducibilidad, si ésta es siempre epistémica o a veces es ontológica o si es posible dar una definición positiva e informativa de tal fenómeno. También es necesario elaborar un análisis del fenómeno de la autorregulación, explicando cuáles son sus partes esenciales, y aclarar si es posible concebir una noción de autorregulación que englobe tanto sistemas naturales como artificiales. Parece necesario, en definitiva, un estudio de la ontología de los sistemas complejos.

Para llevar a cabo este estudio se emplean esencialmente dos herramientas: la mereología y la teoría de la fundamentación. La primera es la rama de la ontología que se dedica al estudio de las relaciones entre los entes y sus partes. La segunda trata de describir las relaciones entre los entes que pueden existir por separado y los que no pueden, o dicho de otra forma, entre los entes dependientes y los independientes. Ambas partes de la ontología han sido objeto de profundo estudio y diversas formalizaciones a lo largo de la historia reciente de la filosofía.

La mereología puede resultar de interés para el estudio de los sistemas complejos en la medida en que puede ayudar a expresar las relaciones que se dan entre los sistemas y sus componentes, así como entre los diferentes niveles que existen dentro de un sistema. La teoría de la fundamentación permitiría, por su parte, estudiar la relación que existe entre las propiedades emergentes, en tanto que entidades dependientes, y el sistema que permite su aparición.

## Objetivos

El objetivo final de este estudio consiste ofrecer una ontología de los sistemas complejos y algunos fenómenos relacionados con la complejidad. Esto pretende conseguirse, por un lado, desarrollando un lenguaje formal basado en la mereología y la fundamentación, y por otro lado, usando este lenguaje para elaborar un formalismo, al que he llamado «Formalismo de la Complejidad», para ofrecer definiciones precisas de las características de los sistemas complejos.

## Planteamiento y desarrollo

En primer lugar, se lleva a cabo un estudio de las obras más relevantes acerca de la complejidad y los sistemas complejos. Las obras de autores como John Holland, Ludwig Von Bertalanffy, Francisco Varela, Stuart Kauffman, Neil Johnson, Melanie Mitchell o Herbert Simon, entre otros, contienen diferentes explicaciones de lo que se entiende por sistema complejo. Dado que cada autor opera desde una óptica diferente, se ponen de relieve sus semejanzas y diferencias, en orden a obtener una visión global de los sistemas complejos y sus principales características.

En segundo lugar, se realiza una investigación acerca de las herramientas ontológicas que se van a emplear en el estudio de los sistemas complejos. Esto se lleva a cabo estudiando las principales propuestas que, en la filosofía contemporánea, se han ofrecido acerca de estas ramas de la ontología. Las principales fuentes para el estudio de la mereología son: la tercera investigación de Edmund Husserl, las obras completas de Stanislaw Lesniewski, la obra *The structure of appearance* de Nelson Goodman y Henry Leonard, así como la obra *Parts and places* de Roberto Casati y Achille Varzi. En cuanto a la fundamentación, se emplea como fuente primaria, de nuevo, la tercera investigación de Husserl, complementada con los estudios y formalizaciones llevados a cabo por autores como Kit Fine, Peter Simons y Gilbert Null. A través del estudio de estas obras, se pretende alcanzar una visión general de qué sean la mereología y la fundamentación, sus posibles relaciones y qué principios han de incluirse en su formulación según los objetivos que tenga la investigación llevada a cabo.

En tercer lugar, se ofrece, utilizando como base los resultados de los dos estudios anteriores, una formulación de una ontología orientada al estudio de los sistemas complejos.

Se considera que dicha ontología ha de estar compuesta, al menos, por una mereología, una teoría de la fundamentación y una teoría de los niveles ontológicos. Estas herramientas teóricas han de permitir dar cuenta de los fenómenos sistémicos en tanto que dependientes de las relaciones entre las partes del sistema, así como una descripción de las jerarquías de entidades que se encuentran dentro de los sistemas.

A continuación, en cuarto lugar, se aplica la ontología recientemente desarrollada a las principales características de los sistemas complejos, las cuales se determinaron en el estudio llevado a cabo al principio de la tesis. En esta sección, se investiga el concepto de emergencia desde el punto de vista filosófico, y se ponen de relieve sus principales problemas: la falta de una definición positiva, la causación descendente y la polisemia del propio concepto. Se hace lo propio con el fenómeno de la autorregulación, enfocando su estudio desde la dinámica de sistemas. A través de las propuestas de solución a algunos de los problemas que estas nociones plantean, se ofrecen definiciones, basadas en la mereología y la fundamentación, de todas las características de los sistemas complejos, así como definiciones de sistema dinámico y de sistema complejo.

Por último, haciendo uso del lenguaje ontológico que se ha desarrollado en todas las investigaciones anteriores, se procede a mostrar una serie de análisis ontológicos de sistemas reales que comparten algún rasgo de los sistemas complejos. Finalmente, se analiza un sistema complejo completo. Así se trata de poner a prueba las definiciones y el lenguaje presentados, mostrando su posible utilidad de cara a describir la ontología de este tipo de sistemas.

## Resultados

A través del estudio de la bibliografía acerca de los sistemas complejos se ha obtenido lo siguiente:

- Una definición global de sistema complejo.
- Una descripción previa de las diferentes características de un sistema complejo.
- Poner de relieve las diferencias entre las visiones de cada uno de los autores estudiados.
- Estudiar si es posible salvar estas diferencias haciendo referencia a un concepto común subyacente.

Con el estudio de la mereología y la fundamentación se han alcanzado los siguientes conocimientos:

- Una visión general de qué es la mereología y para qué se ha utilizado.
- Una descripción de las diferentes formulaciones que se pueden encontrar de la mereología, y en qué consisten sus desemejanzas.

- Un lenguaje estándar que permita formular de forma sencilla una mereología con las características que se deseen, y que a la vez haga posible diferenciarla de forma clara de otras formulaciones con otros objetivos.
- Una definición de fundamentación y sus diferentes tipos.
- Una descripción de cómo pueden relacionarse la mereología y la fundamentación.
- Una formulación formal de los principios de la fundamentación, a través de una comparación entre las propuestas de los diversos autores estudiados.
- Una definición de nivel mereológico.

A través de la reelaboración y puesta en conexión de los conceptos obtenidos en los dos estudios anteriores, se ha obtenido una ontología orientada al estudio de los sistemas complejos que consta de lo siguiente:

- Una mereología no extensional, esto es, que permite lidiar con partes abstractas o dependientes.
- Una teoría de la fundamentación que permite establecer las diferencias entre una dependencia funcional, como la que se da en las máquinas, y una dependencia fuerte o existencial, como la que se observa en los organismos biológicos.
- Una teoría de niveles que permite dar cuenta de la jerarquía de entidades que se suele observar en los sistemas.

Mediante la aplicación de la ontología presentada sobre las principales características de los sistemas complejos, se ha obtenido lo siguiente:

- Se ha propuesto una posible vía de solución al problema de la causación descendente y el cierre causal, a través del concepto de condiciones de frontera.
- Se ha adoptado un criterio que distingue entre varios grados de emergencia según su fuerza, aceptando así casos de emergencia tanto fuerte como débil.
- Se ha ofrecido una definición de emergencia, tanto fuerte como débil, basada en las nociones de parte, fundamentación y nivel.
- Se ha adoptado una definición de autorregulación basada en el concepto de espacio de estados, en la que se distinguen dos grados de autorregulación: relativa y fuerte.
- Se ha desarrollado un lenguaje formal que permite describir de forma abreviada y precisa la ontología de un sistema dinámico.
- Se ha ofrecido una definición tanto de sistema dinámico como de sistema complejo, distinguiendo en éste último varios grados, según la naturaleza de la autorregulación que lo gobierne.

A través de la aplicación del aparato formal y las definiciones de las características complejas que se han ofrecido en los estudios anteriores, se han alcanzado estos resultados:

- Se ha podido observar la estructura ontológica común que subyace a los sistemas autorregulados, independientemente de su fuerza.
- Se ha comprobado la íntima relación en la que se encuentran los fenómenos de emergencia fuerte, causación descendente y autorregulación, constituyendo la base de los sistemas complejos.
- Se ha visto que, al menos en ciertos casos, la comprensión de la causación descendente como una modificación del espacio de estados de un sistema, resulta viable.
- A la par con todo lo anterior, se ha podido apreciar la relativa utilidad del lenguaje ontológico desarrollado cuando éste se destina al análisis de la forma de ser de los sistemas dinámicos.

## Conclusiones

A partir de todos los resultados anteriores, se ha creído posible concluir las siguientes afirmaciones:

- Pueden apreciarse, pese a las diferencias de enfoque entre los diversos estudiosos de los sistemas complejos, al menos cuatro características principales de estos sistemas: dinámica, emergencia, niveles y autorregulación. A pesar de que estos conceptos pueden usarse como guía para diferenciar de forma general entre sistemas complejos y aquéllos que no lo son, su ontología no está clara y en ocasiones pecan de excesiva vaguedad o generalidad.
- Que el término «parte», en los estudios mereológicos, es polisémico, y que la división básica entre partes concretas y abstractas puede usarse para entender la diferencia entre mereologías extensionales y no extensionales. Una mereología que pretenda usarse para el estudio de los sistemas complejos resulta más útil si no es extensional.
- La noción de fundamentación tal y como se presenta en los sistemas axiomáticos estudiados es demasiado general para hacer frente a los fenómenos de dependencia vistos en los sistemas complejos. Así, ha de ser completada a través de definiciones auxiliares que permitan establecer la diferencia entre la dependencia funcional y la dependencia fuerte.
- Se puede obtener una definición de nivel mereológico con una forma recursiva y a través del lenguaje mereológico estándar. Después, este concepto puede ser ampliado para resultar más adecuado al estudio de sistemas reales.

- Pueden observarse en la naturaleza casos que encajan con la noción de emergencia débil y otros con la de emergencia fuerte. Por tanto, puede resultar útil adoptar una suerte de escala de grados de emergencia, en lugar de rechazar una de las dos opciones. En cuanto a la emergencia fuerte, la causación descendente puede ser entendida como un cambio en el espacio de estados posibles del sistema, haciendo uso del concepto de condiciones de frontera. Respecto de la autorregulación, también parece necesario realizar una distinción de grados para hacer frente a los fenómenos biológicos y distinguirlos de los mecánicos, en los que el origen de los parámetros no procede del propio sistema sino que es externo.
- La emergencia fuerte, la causación descendente y la autorregulación se presentan como los pilares ontológicos de un sistema complejo, que además guardan una estrecha relación entre sí: la emergencia fuerte provoca la causación descendente, la cual a su vez es la base de la autorregulación, pues permite seleccionar ciertos estados del sistema a partir de mecanismos internos únicamente.

# Summary

## Title

COMPLEX SYSTEMS AND MEREOLGY.

## Introduction

The concept of complex system arises as an answer to certain kind of problems that appear when some phenomena, whose behaviour is not explainable exclusively through their parts, are investigated. From anthills to traffic jams, regarding all complicated biological frameworks of the animal body, there is a plenty of systems that, due to an intricate interaction between diverse kinds of parts, give rise to unexpected global behaviours.

This situation makes habitual the use of concepts like emergence and self-regulation in the study of complexity. It is said that a system has emergent properties when these are not reducible to the elements of lower levels. On the other hand, a self-regulated system is able to guide its action, via modification of its parameters, without the intervention of a centralized or exterior control.

However, the way this complexity's features are is far from clear, both from a scientific and philosophical point of view. It is necessary to make explicit, in reference to the concept of emergence, what is to be meant by non-reducibility, if it is always epistemic, or is sometimes ontological, or if it is possible to offer a positive and informative definition of this phenomenon. Also it is necessary to elaborate an analysis of the self-regulation phenomenon, explaining its essential parts, and telling if it is possible to obtain a notion of self-regulation which is applicable both to natural and artificial systems. Definitely, a study of the ontology of complex systems seems to be necessary.

In order to carry out this study, two main tools are utilized: mereology and foundation theory. The first is a branch of ontology dedicated to the study of relations between entities and its parts. The second describes the relations between entities which are able to exist separately and entities which are not, or in other words, between dependent and independent entities. Both branches of ontology have been deeply studied and diverse formalizations of them have been offered along the recent history of philosophy.

Mereology could be of interest for the study of complex systems to the extent that it would help to articulate the relations between the systems and their components, and also between the different levels that exist within a system. Foundation theory, on the other hand, would make the study of the relation between emergent properties as dependent entities and the system that allows their existence accessible.

## Goals

The main goal of this study is to offer an ontology of complex systems and some complexity related phenomena. This is intended to be achieved, on the one hand, by the development of a mereology and foundation theory based formal language, and on the other hand, using this language, which has been named «Complexity Formalism», to offer precise definitions of the complex systems' features.

## Approach and development

In the first place, a study of the more relevant works on complexity and complex systems is carried out. The works of John Holland, Ludwig Von Bertalanffy, Francisco Varela, Stuart Kauffman, Neil Johnson, Melanie Mitchell or Herbert Simon, between others, contain different explanations about what is meant by the term «complex system». Each author develops his study from a different point of view, and the differences and resemblances between all the perspectives are highlighted, in order to achieve a global vision of complex systems and their main features.

In the second place, an investigation concerning the ontological tools that will be employed in the study of complex systems is presented. This is accomplished by means of the study of the main approaches offered in contemporary philosophy about this ontology branches. The main sources for mereology are: the third logical investigation of Edmund Husserl, the complete works of Stanislaw Lesniewski, Nelson Goodman's and Henry Leonard's *The structure of appearance*, and *Parts and places* of Roberto Casati and Achille Varzi. In the study of foundation theory, Husserl's third investigation is again the main source, complemented with studies and formalizations carried out by authors like Kit Fine, Peter Simons and Gilbert Null. Through the study of these works, a global vision on what mereology and foundation are is intended to achieve. Also, it is studied which are their possible relations, and which principles have to be included in their formalization depending on the goals of the investigation.

In the third place, a complex systems oriented ontology is offered. It is based on the results of the previous investigations. It is suggested that this ontology needs, at least, a mereology, a foundation theory and a theory of levels. These theoretical tools should allow us to deal with systemic phenomena, to the extent that they are dependent on the relations

between the system's parts. Also, this ontology should be able to offer a description of the hierarchies of entities within the systems.

Then, in fourth place, this recent developed ontology is applied to the main features of complex systems, which were identified at the beginning of this doctoral thesis. In this section, emergence is investigated from a philosophical point of view, and its main problems are highlighted: the lack of a positive definition, the downward causation and the polysemy of the concept. The concept of self-regulation is also examined, using a dynamic systems approach. Through the proposals of solution to some of these problems, mereology and foundation theory based definitions of the main features of complex systems are presented, beside a definition of dynamic system and of complex system.

Finally, making use of the ontological language developed in all the previous sections, an ontological analysis of real systems which have some common features with complexity is shown. Then, a complete complex system is analyzed. Thus, the previously presented language and definitions are tested, examining their possible usefulness in the task of studying the ontology of complex systems.

## Results

Through the study of the bibliography on complex systems, the next results have been obtained:

- A global definition of complex system.
- A provisional description of the features of complex systems.
- The differences between the studied authors have been highlighted.
- The possibility of a common concept of complex system shared by all the authors have been studied.

Through the study of mereology and foundation, the next knowledge have been achieved:

- A general view of what is mereology and what it is used for.
- A description of the different formulations of mereology that one can found, and which are the differences between them.
- A standard language that allows to formulate, in a simple way, a mereology with the desired features, and at the same time makes possible to differentiate it from other mereologies with other goals.
- A definition of foundation and its different types.
- A description of the possible relations between mereology and foundation theory.

- A formal presentation of the principles of foundation, through a comparison between the approaches of the different studied authors.
- A definition of mereological level.

By means of a re-elaboration and connection of the concepts coming from the former studies, a complex systems oriented ontology have been obtained. It has the following components:

- A non-extensional mereology, which is able to deal with abstract or dependent parts.
- A foundation theory that allows to establish the differences between functional dependence, as seen in machines, and strong or existential dependence, as seen in biological organisms.
- A theory of levels which makes possible to describe the hierarchies between entities as seen in systems.

Through the application of the presented ontology to the main features of complex systems, these results have been obtained:

- A possible solution to the problem of downward causation and the causal closure, using the concept of boundary conditions.
- A criterion to distinguish between various grades of emergence, including weak and strong emergence.
- A definition of emergence, both weak and strong, based in the concepts of part, foundation and level.
- A definition of self-regulation based on the concept of state space, in which two grades of self-regulation are distinguished: relative and strong.
- A formal language which makes possible to describe in a short and precise fashion the ontology of a dynamic system.
- A definition of both dynamic and complex systems, distinguishing various grades of complex systems, depending on the grade of its self-regulation.

The application of the formal language and the definitions of complex features obtained in previous sections, has brought the next results:

- The common ontological structure of self-regulated systems, independently of its grade, has been observed.
- The close relation between strong emergence, downward causation and self-regulation, that constitutes the basis of complex systems, has been remarked.

- It has been seen that, at least in certain cases, the understanding of downward causation as a modification of a system's state space is helpful.
- At the same time with all the former, it has been appreciated the relative usefulness of the developed ontological language when it is applied to the analysis of the dynamic systems' way of being.

## Conclusions

With all the former results as a cornerstone, the next assertions are considered reasonable:

- It can be appreciated, despite the different approaches between the experts in complex systems, at least four main features of complex systems: dynamics, emergence, levels and self-regulation. These concepts could be useful as a general guide for complex systems, but their ontology is not so clear, and they suffer from excessive generality.
- In the mereological studies, the term «part» is polysemic, and the division between concrete and abstract parts could be used to understand the difference between extensional and non-extensional mereologies. If a mereology is intended to use in the study of complex systems, it must be non-extensional.
- The notion of foundation, as it is presented in the studied axiomatic systems, is too general to deal with the cases of dependence seen in the complex systems. Thus, it has to be completed through auxiliary definitions that make possible to establish the difference between strong and functional dependence.
- It can be obtained a definition of mereological level in a recursive form, using the standard mereological language. After that, this concept is susceptible of an amplification for its use in the study of real systems.
- In nature, concordant cases with both, the strong and weak emergence concepts, can be seen. Then, it could be useful to adopt an emergence grade scale, in place of reject one of both options. In reference to the strong emergence, downward causation can be seen as a change in the possible state space of the system, making use of the concept of boundary conditions. In respect to the self-regulation, it seems necessary to make a distinction between diverse grades to deal with biological phenomena, and differentiate them from the mechanical ones, in which the origin of the parameters is not the activity of the system.
- Strong emergence, downward causation and self-regulation are seen as the ontological cornerstones of a complex system. Also, they keep a close relation between them: strong emergence induces downward causation, which is the basis for self-regulation,

because it allows to select certain states of the system exclusively using internal mechanisms.

# Capítulo 1

## Introducción

Vivimos rodeados de sistemas que se organizan por sí mismos, que exhiben propiedades novedosas en algún sentido, que poseen tantos elementos en interacción que resultan, a simple vista, inabarcables para nuestra comprensión. Basta observar casos como los siguientes: un animal y su complicada forma de existir, intentando mantener su temperatura constante frente a las inclemencias de su entorno, introduciendo dentro de sí elementos extraños que deglute y cuyos componentes incorpora a su propia estructura, la cual está formada por órganos, que se dividen en tejidos, que se dividen en células, proteínas, lípidos, etc.; un ecosistema, compuesto de miles de seres que se relacionan, cooperan, se depredan; un hormiguero, en el que cientos o miles de individuos, apenas guiados por unos pocos y sencillos mecanismos, son capaces de mantenerse por mucho tiempo; el propio cerebro humano, con sus millones de neuronas y sinapsis, cortezas y circunvoluciones, transmitiendo impulsos eléctricos que, a través de un complicado entramado, dan lugar a la percepción, la memoria, el lenguaje; una ciudad; un ciclo económico... Los ejemplos son infinitos, y por ello resulta evidente que todos estos fenómenos no han sido pasados por alto a lo largo de la historia: la biología, la medicina, la física, la química y todas las demás ciencias han estudiado, de una forma u otra, muchos de los aspectos que estos ejemplos contienen. ¿Cuál es, entonces el punto novedoso que aporta el estudio de los sistemas complejos?

El concepto de sistema complejo esconde, como algunos ha apuntado, viejos problemas a través de un nuevo modo de pensar. Esta afirmación puede interpretarse en dos sentidos.

Por un lado, en el estudio de este tipo de sistemas solemos encontrarnos con antiguos problemas filosóficos. En primer término encontramos la oposición entre el método analítico y el método sintético, o las visiones que tienden a dividir los problemas en entidades más simples frente a las que muestran un talante integrador u holístico. Es cierto que estas actitudes no suelen darse de manera absoluta en una investigación, pero en términos generales, la balanza ha solido inclinarse hacia perspectivas más bien analíticas. También tiene una gran presencia en las investigaciones sobre la complejidad la antítesis entre el orden y el desorden: qué significa que un conjunto de entes esté ordenado, y cómo es

posible que aparezca el orden a partir de algo desordenado. Esta última cuestión lleva, inevitablemente, a preguntarse si el orden existe realmente fuera del sujeto o es una mera construcción.

Se encuentran, por otro lado, conceptos científicos ya establecidos que, en cierta medida, son el origen de los problemas filosóficos. La termodinámica, disciplina nacida en el siglo XIX, aparece en el estudio de los sistemas complejos, no para que sus principios sean criticados, sino para ser aplicados a casos diferentes: si la entropía de un sistema siempre crece, ¿cómo expresar, en estos términos, la manera de ser de un sistema que mantiene un orden durante cierto tiempo? Cuestiones similares ocurren respecto de la teoría de la información, la teoría del caos, la teoría de redes... Una amalgama de ciencias ya conocidas tratan de trabajar juntas para comprender un sistema.

Esto se debe a que los estudios sobre complejidad se centran, más bien, en los aspectos sistémicos generales, aquellas estructuras que varias entidades puedan compartir debido a su común forma de ser. Esta forma de ser suele ser descrita, en términos generales, como la posesión de una gran cantidad de elementos relativamente sencillos que, debido a sus interacciones, dan lugar a nuevas entidades. Estas nuevas entidades, ya sean procesos, propiedades, estructuras... son los productos sistémicos, y la manera en que aparecen es uno de los principales objetos de estudio de aquéllos que examinan la complejidad. Es por esto por lo que suele necesitarse la cooperación de varios campos científicos, pues es en las bisagras o zonas de unión entre disciplinas, en el cambio de ámbito, en la aparición de novedades o, en definitiva, en la emergencia, donde se posa la mirada de los sistemas complejos.

Por estas razones, en un estudio de estas características es donde tiene sentido preguntarse por la autorregulación o la emergencia, y sus estructuras generales. Bajo la suposición de que estos fenómenos vienen dados por mecanismos similares, quizá se pueda encontrar algo que ayude a comprender su génesis de forma general. Ésta sería, a grandes rasgos, la novedad de la perspectiva de los sistemas complejos respecto de otras formas de estudio de los fenómenos. Algunos autores, como Holland o Kauffman, han examinado la idea de leyes o principios generales de los sistemas complejos, una suerte de leyes estadísticas que permitan describir su peculiar relación con el orden, el caos y las multitudes en interacción.

Sin embargo, estas aspiraciones conllevan, a su vez, ciertos problemas propios: la falta de definición de los conceptos empleados para enunciar el comportamiento de los sistemas complejos, o por decirlo así, la oscuridad de su ontología. Cuando se habla de un fenómeno tan general, e incluso vaporoso, como la autorregulación, suele darse por hecho que es comprendido en su naturaleza más íntima. Pero la realidad es que, muchas veces, esto no sucede. Es en este tipo de problemas en los que esta tesis pretende centrarse: el estudio de la ontología de los sistemas complejos a través de un escrutinio de las principales características de éstos. La manera de llevar a cabo este estudio se expone a continuación.

La primera parte está dedicada al estudio de la literatura especializada en los sistemas complejos.

En esta parte, el capítulo segundo está dedicado, en primer lugar, a ciertos autores que se consideran precursores del concepto de sistema complejo tal y como hoy se lo conoce, como Herbert Simon, Bertalanffy o Michael Polanyi. En estos autores ya se encuentran las ideas de emergencia, autorregulación, jerarquías de niveles y la visión sistémica de la realidad, entre otras. Tras este repaso histórico, se estudia la visión actual de los sistemas complejos a través de John Holland, Melanie Mitchell, Stuart Kauffman y Neil Johnson.

En el tercer capítulo se lleva a cabo una puesta en común de todo lo estudiado en los diferentes autores, los cuales, pese a diferencias metodológicas, describen los sistemas complejos básicamente a través de los siguientes conceptos: dinámica, emergencia, niveles y autorregulación. A continuación, se lleva a cabo una crítica de estos conceptos en la que se ponen de relieve los posibles problemas que pueden suscitar desde el punto de vista ontológico. La clara formulación de estos problemas, así como algunas propuestas para su solución, serán los grandes pilares de esta investigación.

La segunda parte contiene un estudio de diferentes conceptos ontológicos que se propondrán como herramientas para definir de forma clara los distintos fenómenos que integran un sistema complejo.

El capítulo cuarto se dedica al estudio de la mereología. Esta rama de la ontología estudia las relaciones de todos y partes, por lo que resulta un buen punto de partida para comenzar a estudiar los sistemas complejos desde un punto de vista ontológico. Un sistema puede verse como un todo y sus elementos como partes que guardan relaciones entre sí. El punto de partida del estudio de esta disciplina es la tercera Investigación de Husserl, y continúa a través de la obra de Lesniewski, Leonard, Goodman y, por último, los estudios contemporáneos de Roberto Casati y Achille Varzi.

Al contemplar un sistema complejo como un todo, se observa que dicho todo posee ciertas propiedades peculiares que dependen de unas determinadas configuraciones de partes. Estas propiedades sistémicas son, en definitiva, entidades dependientes. Es por esto por lo que el capítulo cinco está dedicado al concepto de fundamentación, a través del cual, como propone Husserl en la citada Investigación, se pueden definir los conceptos de parte concreta y parte abstracta. Una parte abstracta sería, en síntesis, la que depende de otras para existir. Esta idea puede extenderse a las propiedades sistémicas para enunciar su naturaleza dependiente. El concepto *husserliano* originario se discute a través de los intentos de formalización de estas ideas llevados a cabo por autores como Kit Fine, Peter Simons o Gilbert Null.

En el capítulo sexto se puede encontrar una reflexión en torno al concepto de nivel. Al estudiarse un sistema como un todo con partes, suele ser recurrente la idea de considerar dichas partes en un nivel, y el todo o las propiedades sistémicas en un nivel superior. Ahora bien, esta idea, pese a considerarse ampliamente aceptada, no parece haber recibido un tratamiento ontológico adecuado. En el capítulo se examinan algunos de los tratamientos

que ha recibido el concepto de nivel para tratar de concluir qué es lo que hace falta a la hora de ofrecer una definición y una descripción de las relaciones entre niveles.

Una vez se han recogido los conceptos ontológicos básicos, así como algunos de sus problemas y carencias, se pasa a ofrecer, en el capítulo séptimo, el desarrollo de una ontología orientada a la descripción de la estructura de los sistemas. En primer lugar, se discuten algunas de las carencias del concepto de fundamentación de cara a la ontología sistémica, y se propone una solución a través de algunas ampliaciones y añadidos. En segundo lugar, se establece qué tipo de mereología es necesaria y cómo se consigue: una mereología no extensional. Esta mereología, unida al remodelado concepto de fundamentación, podría estar en condiciones de tratar con los todos con partes abstractas. En último lugar, se ofrece una definición formal de los niveles y sus relaciones, que completa el conjunto al permitir organizar las partes del sistema según su puesto en la jerarquía.

La tercera y última parte de la tesis se dedica a la aplicación de los conceptos ontológicos a los problemas que suscitan las propiedades de los sistemas complejos, así como al estudio de algunos ejemplos concretos de sistema.

En el capítulo octavo se exponen de forma clara y extensa los problemas que suscitan la emergencia, la causación descendente y la autorregulación. Los principales problemas podrían enunciarse de forma sintética así: la violación del cierre causal, la polisemia de la emergencia y la reductibilidad de las entidades emergentes. A su vez, se exponen algunas posibilidades que ayudarían en su solución. En la última parte del capítulo se desarrolla lo que se ha denominado un «formalismo de la complejidad», que no es sino la definición de las propiedades de los sistemas complejos a través del lenguaje mereológico que se ha desarrollado, y una vez que se han modificado los conceptos que refieren dichas propiedades utilizando como guía las propuestas de solución ofrecidas en la primera mitad del capítulo.

Por último, en el capítulo noveno, se analizan diversos sistemas que poseen propiedades consideradas afines a la complejidad. Ello se lleva a cabo a través del lenguaje construido en el «formalismo de la complejidad». El objetivo de estos estudios es observar la estructura ontológica básica de propiedades como la emergencia débil y fuerte, la autorregulación, la causación descendente, etc., así como su comparación con las definiciones ofrecidas. Todo lo aprendido en estos análisis se aplica a un último estudio en el que se analiza un sistema complejo completo, en el que se comprueba la fuerte conexión que existe entre los fenómenos de la emergencia, la causación descendente y la autorregulación.

## Parte I

# Estudio de los sistemas complejos



## Sistemas complejos

### 2.1. Una 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 fuente principal en este capítulo. La razón de la elección de estos autores estriba en la visión general que aportan acerca de la complejidad, llevando a cabo en cierta manera un recorrido por los principales temas y disciplinas involucrados.

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 2004, pág. 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 2009, pág. 13)
2. «a system that exhibits nontrivial emergent and self-organizing behaviors.» (Íb.)

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 2009, págs. 3-4)

Von Bertalanffy, aunque pertenezca a una escuela 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 2007, pág. 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>1</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:

- 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. Este fenómeno también se suele denominar autoorganización o autorregulación.
- 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».
- Algunos teóricos sostienen que las propiedades emergentes o conductas emergentes sí son reducibles realmente a las reglas o propiedades primitivas del sistema, pero

---

<sup>1</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.

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>2</sup>.

Enumeraciones de características similares pueden verse en Maldonado y Cruz 2011, pág. 47 y Ladyman, Lambert y Wiesner 2013, págs. 4-9.

## 2.2. Los orígenes de los sistemas complejos

Es habitual encontrarse con la afirmación de que un sistema complejo consiste en un conjunto de elementos cuyas interacciones dan lugar a conductas o propiedades emergentes. Sin embargo, antes de introducirse en un estudio algo más profundo de este enunciado, así como del significado de «emergencia» o de algunos de los demás fenómenos que se asocian con la complejidad, conviene dar un paso atrás y preguntarse por el origen del propio concepto de sistema complejo. La complejidad y los sistemas complejos han sido el centro de muchas reflexiones y estudios desde hace al menos treinta años, pero el origen del uso de estos conceptos puede retrotraerse algunos años más.

Las razones para esta mirada hacia atrás son múltiples. En primer lugar, sirve para recordar que los conceptos, por lo general, no aparecen de forma caprichosa, sino con el objetivo de lidiar con ciertos problemas. Comprender la razón de la existencia del campo de los sistemas complejos resultará beneficioso para el propósito de esta tesis. Esto es debido a que el estudio del origen del concepto puede ayudar al estudio de sus fundamentos. Perfilar éstos de manera adecuada es una de las principales metas de un estudio ontológico de la complejidad. Como añadido, se puede observar que los escritos que se van a presentar, en cierto sentido fundacionales, tienden a poseer un contenido filosófico mayor, por su carácter especulativo, lo que ayudará enormemente en esta tarea. Por último, observar la trayectoria del pensamiento sobre la complejidad será de ayuda en la comprensión del camino que ha de seguir.

A través de algunos artículos clave de autores de mediados del siglo XX se tratarán de identificar los gérmenes de algunos de los conceptos y problemas que han estado presentes en el estudio de los sistemas complejos. Por supuesto, la retrospectiva podría haberse comenzado en un pasado mucho más lejano. Como señala Melanie Mitchell, pueden rastrearse los orígenes de la complejidad incluso al «problema de los tres cuerpos», en el siglo XIX. (Mitchell 2009, págs. 21-22) Sin embargo, se ha preferido comenzar por un pasado reciente, en el que ya se identifican claramente, sin mucho esfuerzo, algunos ingredientes del pensamiento típico sobre lo complejo.

---

<sup>2</sup>La distinción entre emergencia fuerte y débil se toma de Chalmers 2006, 244 y ss.

### 2.2.1. Sistemas autoorganizados

En su artículo *Principles of the self-organizing systems* (Ashby 1962), William Ross Ashby, considerado uno de los grandes impulsores de la cibernética, trata la idea de los sistemas que son capaces de guiarse u organizarse a sí mismos debido a la propia colocación de sus partes, sin necesidad de ayuda exterior.

La organización es, en primer lugar, un conjunto de estados actuales de entre todos los estados posibles de un sistema. Estos estados se comunican entre sí, y si existe comunicación entre A y B, los estados de A limitan o constriñen los de B. Según el autor, la organización presenta los siguientes rasgos:

- Condicionalidad: la organización se da cuando la relación entre dos elementos depende de un tercero.
- No-reducibilidad: estos elementos no actúan de forma independiente.

Se está hablando, en definitiva, de un todo y sus partes. (Ashby 1962, pág. 106) Esta organización, la estructura del todo, se encuentra en parte en el observador.

En este punto se introduce la noción de máquina, que será minuciosamente observada más adelante por Bertalanffy (en la sección 2.2.6). Para Ashby, una máquina puede ser definida sin apelar para nada a la materialidad o la energía, resultando en lo siguiente: algo cuyo estado interno, junto con el estado de lo que le rodea, define el estado interno en el momento siguiente. (Ashby 1962, pág. 109) Los sistemas continuos, afirma, pueden ser descritos mediante ecuaciones diferenciales; sin embargo, lo biológico, por ser discontinuo, queda fuera de esta definición.

En una máquina se tienen, pues, los siguientes elementos: estados internos, *inputs* y mapeo (una función que relaciona los *inputs* con los estados internos). La organización entre las partes es entonces especificada por dicho mapeo.

Ashby sostiene que las máquinas (y los organismos) se guían por la homeostasis, la tendencia a volver a cierto rango de valores de equilibrio. (Ashby 1962, pág. 111) Este es el criterio para discernir las buenas de las malas organizaciones. Una buena organización llevará a la máquina hacia el equilibrio, pero no considerado de manera absoluta, sino respecto de algún fin.

Una vez establecidos estos términos, Ashby pasa a tratar propiamente la autoorganización. Esta puede darse en al menos dos sentidos (Ashby 1962, pág. 114):

- Como partes separadas que se juntan
- Como cambio de una mala organización a una buena

Existen ejemplos del primer sentido, como la formación del sistema nervioso en el embrión, durante la cual las células comienzan a tener cada vez más influencia unas sobre otras. Sin embargo, en estos casos no parece que se pueda disponer de un criterio para

discernir una buena organización de una mala. Ashby parece afirmar esto debido a que en este sentido no se tiene en cuenta el propósito o el entorno del sistema. Es por ello por lo que propone a continuación el segundo sentido.

Se afirma tras esto tajantemente que ninguna máquina podría autoorganizarse en el segundo sentido. Esto es así porque los estados de la máquina son producto de la función o mapeo, y pedir autoorganización en este sentido requeriría que dicha función cambiase en base a los estados, lo cual resulta absurdo por ser un círculo vicioso. La forma de abordar este problema sería concibiendo una meta-función según la cual cambien las funciones de mapeo a lo largo del tiempo. Sin embargo, este cambio habría de venir de los *inputs* del entorno, y no de los propios estados de la máquina. De esta forma, este tipo de autoorganización sólo podría darse en el caso de una máquina unida a otra: una de ellas, portadora de la meta-función, le proporciona a la otra los *inputs* necesarios para que cambie de mapeo a lo largo del tiempo. Pero esto parece algo alejado de la idea que se tenía al comienzo sobre la autoorganización. Por estas dificultades, Ashby propone que quizá el propio concepto de autoorganización debería ser abandonado. (Ashby 1962, pág. 117)

Sin embargo, más adelante acaba concediendo que la autoorganización puede aparecer también en un tercer sentido: el del origen de la vida. (Ashby 1962, pág. 117) En este sentido, cabría admitirse que todo sistema dinámico genera organismos que se adaptan y, a la larga, organismos inteligentes. Este fenómeno se debe a la tendencia al equilibrio, pues en función de ella se seleccionan los estados que más se le acercan. El argumento es el siguiente:

We start with the fact that systems in general go to equilibrium. Now most of a system's states are non-equilibrium (if we exclude the extreme case of the system in neutral equilibrium). So in going from any state to one of the equilibria, the system is going from a larger number of states to a smaller. In this way it is performing a selection, in the purely objective sense that it rejects some states, by leaving them, and retains some other state, by sticking to it. Thus, as every determinate system goes to equilibrium, so does it select. We have heard *ad nauseam* the dictum that a machine cannot select; the truth is the opposite: every machine, as it goes to equilibrium, performs the corresponding act of selection. (Ashby 1962, pág. 118)

Este último es, sin duda, el posible sentido del concepto que más se acerca a lo que actualmente se trata en complejidad. Debido a la propia dinámica del sistema, los estados favorables son seleccionados para dar lugar a un conjunto de estados nuevo.

Asimismo, la noción de máquina propuesta, que en un sentido mucho más técnico aparece en *An introduction to cybernetics* (Ashby 1957), será empleada de manera similar por algunos autores, como Holland, para caracterizar el comportamiento de los agentes que integran un sistema complejo.

### 2.2.2. Sistemas complejos adaptativos

En 1968 el sociólogo Walter Buckley hace uso, en *Society as a complex adaptive system*, de la célebre noción de sistema complejo adaptativo, que Holland retoma en sus trabajos. Contradiendo en cierto sentido a Ashby, piensa que las teorías del equilibrio ya no sirven, al menos en el terreno sociológico, y han de ser sustituidas por una visión sistémica. (Buckley, Schwendt y Goldstein 2008, pág. 89) Según Buckley, se podría decir que existen tres tipos de sistemas (Íb.):

- Sistemas en equilibrio:
  - Son cerrados
  - Son entrópicos
  - No se adaptan ni se autorregulan
- Sistemas homeostáticos:
  - Son neguentrópicos
  - Mantienen su estructura dentro de unos límites (se autorregulan)
  - Intercambian energía e información
- Sistemas complejos adaptativos:
  - Intercambian información y energía entre sus componentes y con el exterior
  - Poseen adaptación (cambian su estructura)
  - Poseen retroalimentación (se autodireccionan)

Buckley se centra entonces en la descripción de los sistemas complejos adaptativos, los cuales considera un nuevo paradigma. Estos sistemas están compuestos de individuos cognitivos: mapean el entorno, creando estructuras que representan la realidad, lo que les permite discriminar elementos de ese entorno. Esta información que manejan los individuos codifica el entorno y refleja su variedad. Este tipo de sistemas posee, además, plasticidad. (Buckley, Schwendt y Goldstein 2008, pág. 90) Ésta consiste en una fuente de variación, un criterio de selección sobre esa variación y un mecanismo de reproducción que permita propagar las variaciones seleccionadas. Se ha de recordar que se está en una perspectiva relacional y la pregunta por la sustancia es secundaria. (Íb.) De esta forma, se puede estar hablando tanto del ADN, el sistema nervioso, o una cultura, la cual también surge por selección de mecanismos que emergen. En la sociedad, la necesidad de anticipación y el aumento de la complejidad del entorno favorecen la aparición de nuevas estructuras, tales como los símbolos, la conciencia, el trato con el pasado y el futuro, las evaluaciones, etc.

Todos estos mecanismos van más allá de la homeostasis, pues no simplemente se mantienen estructuras, sino que se crean otras nuevas. Se mantiene cierto estado del sistema, y para ello puede que la estructura cambie. No ha de confundirse, por tanto,

el sistema complejo adaptativo con su estructura pues, precisamente, la continuidad del sistema exige cambiar la estructura. Al hilo de esto, se ofrece una definición de sistema similar hasta cierto punto a lo que solemos encontrar en este tipo de literatura: un sistema es un complejo de elementos o componentes directa o indirectamente relacionados en una red causal, tal que al menos alguno de los componentes esté relacionado con otros de una manera más o menos estable en todo momento. (Buckley, Schwendt y Goldstein 2008, pág. 92)

Resulta del máximo interés observar cómo se adelantan algunas nociones clave de los sistemas complejos adaptativos tal y como se conocerán después (fuente de variación, mecanismo de selección, etc.). Además, se manejan características que se observarán también más adelante en la concepción sistémica de Bertalanffy: apertura a la información y la energía, autorregulación y autodirección.

### 2.2.3. Condiciones de frontera

El concepto de condición de frontera resultará de máxima utilidad a la hora de comprender la manera en que un sistema complejo se organiza a partir de reglas sencillas. En 1968 Michael Polanyi presenta en su *Life's irreducible structure* (Polanyi 2012) la siguiente idea: la estructura que emerge de las leyes de la física y la química impone restricciones a esas mismas leyes. Pensemos, por ejemplo, en una máquina. Ésta posee una estructura que ha sido creada por el hombre, pero sus piezas siguen rigiéndose por los principios de la física. Si se piensa en estas leyes como algo universal, aplicable a una infinidad de objetos, se verá que éstas se hallan, por así decir, constreñidas en la estructura particular de la máquina: en ella, estas leyes son aprovechadas de una manera concreta. Así, se pueden distinguir dos niveles: el superior, compuesto por la estructura, y el inferior, poblado por las leyes naturales. Cabe señalar que estas condiciones de frontera no interfieren, no modifican, las leyes del nivel inferior. O sea, no pueden violarse las leyes fundamentales de la naturaleza, sino sólo dirigirse.

En los organismos, también sucede que su estructura es su propia condición de frontera:

the organism is shown to be, like a machine, a system which works according to [this principle]: its structure serves as a boundary condition harnessing the physical-chemical processes by which its organs perform their functions. (Polanyi 2012, pág. 149)

Es así como puede surgir en los organismos un sentido, una dirección de actuación: la fisiología dota de este sentido a lo físico-químico. Y a su vez, estas condiciones son extrañas al proceso que delimitan, es decir, que no pueden ser definidas únicamente a través de los procesos del nivel inferior. La morfología de los seres vivientes es una estructura emergente que trasciende las leyes de la física y la química.

El ADN es un elemento clave en la formación de los organismos. Es lo que inicia y controla el mecanismo que actúa como una condición de frontera; sería algo así como

el plano intermediario entre la estructura y las leyes naturales básicas. Además, el ordenamiento de sus bases no es debido a leyes físico-químicas, sino que se encuentra en un nivel superior de organización. Al problema de la conexión entre el ADN y la morfogénesis Polanyi trata de ofrecer una solución vitalista: existe un principio regenerador que guía el proceso, como el observado por Driesch en los erizos de mar. De la misma forma que el movimiento de un cuerpo pesado es controlado por el gradiente de energía potencial, la embriogénesis es controlada por el gradiente de formas potenciales.

En biología se van conformando jerarquías a través de apariciones sucesivas de condiciones de frontera, dado que los niveles inferiores van dejando indeterminaciones que son completadas por los niveles superiores. Así, cada nivel reduce el alcance del anterior imponiendo condiciones. Los seres vivos, entonces, son una serie de jerarquías de este tipo, y la evolución no es sino un proceso en el que la complejidad va creciendo, pues se van añadiendo niveles.

Según lo visto, afirma Polanyi, se observará que ya no resulta útil el reduccionismo a la hora de tratar de comprender este entramado de jerarquías, pues precisamente para comprenderlas hay que tomar en cuenta lo nuevo que surge, la emergencia de nuevas condiciones.

Dejando a un lado el recurso a una fuerza vitalista, el concepto de condiciones de frontera contiene una intuición muy interesante y que suele aparecer de una forma u otra a la hora de tratar con la complejidad. A saber: que las interacciones de elementos según las leyes naturales dan lugar a estructuras nuevas, las cuales inclinan esas mismas leyes en una determinada dirección. En Neil Johnson se verá, por ejemplo, que una de las características de los sistemas complejos es estar inclinados (*biased*) hacia ciertos estados, dejando de lado de esta forma gran cantidad de estados posibles del sistema. Asimismo, las ideas acerca de jerarquías y niveles también resultan recurrentes, como se verá a continuación.

#### 2.2.4. Arquitectura de la complejidad

En 1962 Herbert A. Simon escribía acerca de la arquitectura de la complejidad (Simon 1962)<sup>3</sup>. En primer lugar, para Simon la complejidad significa lo siguiente:

Roughly, by a complex system I mean one made up of a large number of parts that interact in a nonsimple way. In such systems, the whole is more than the sum of the parts, not in an ultimate, metaphysical sense, but in the important pragmatic sense that, given the properties of the parts and the laws of their interaction, it is not a trivial matter to infer the properties of the whole. (Simon 1962, pág. 468)

Estos sistemas están compuestos a su vez de subsistemas, que a su vez poseen sus propios subsistemas. Es decir, son sistemas jerárquicos, y como tales tienen una serie de

---

<sup>3</sup>Resulta del todo relevante, respecto de esta temática, su obra *The sciences of the artificial* (Simon 1996).

propiedades comunes. Haciendo alusión a la teoría general de sistemas, se centrará en la posibilidad de estudiar esas propiedades comunes.

Un sistema jerárquico es entonces el que está compuesto de subsistemas interrelacionados, cada uno de los cuales es también jerárquico hasta que alcanzamos el nivel más bajo de subsistemas elementales. (Simon 1962, pág. 468) Este nivel elemental es en cierta medida arbitrario, pues depende de lo que las teorías científicas empleadas consideren elemental. Por ejemplo, la física y las partículas elementales. La extensión o alcance (*span*) de un sistema es entonces el número de subsistemas en que está particionado.

Para tratar de ilustrar cuál es el sentido de que aparezcan sistemas jerarquizados en la naturaleza, Simon propone una parábola acerca de dos relojeros. (Simon 1962, pág. 470) El primero de ellos posee un diseño con etapas intermedias, de forma que puede interrumpir su trabajo y más tarde volver a él sin perder todo lo que ha logrado hasta el momento. Su diseño es más lento de construir, pero más seguro en cierto sentido. En cambio, el segundo relojero, con un diseño más rápido, puede fabricar los relojes a más velocidad. Pronto supera a su competidor y comienza a vender muchos relojes, pero esto también resulta ser, paradójicamente, su perdición. Y es que comienzan a lloverle los encargos, y cada vez que interrumpe su trabajo para atender una llamada, pierde todo lo que llevaba hecho, quedándose continuamente estancado. Finalmente, termina siendo el primer relojero el que menos tiempo tarda en fabricar sus relojes.

En la evolución biológica, el tiempo requerido para la aparición de una forma compleja a partir de elementos simples depende del número y distribución de potenciales formas intermedias estables. Aunque este tiempo pueda parecer mucho más largo que el desarrollo de un organismo «de una vez» sin etapas intermedias, este suceso es altamente improbable, y más cuanto más complejo sea el organismo.

En este esquema, la dirección hacia lo complejo que exhiben los organismos no reposa en ningún mecanismo teleológico, sino que es fruto de mecanismos aleatorios y de la propia manera en que se conforman los niveles intermedios: «Direction is provided to the scheme by the stability of the complex forms, once these come into existence. But this is nothing more than survival of the fittest-i.e., of the stable.» (Simon 1962, pág. 471) Es decir, que una vez que se ha alcanzado una forma estable, esta sobrevive en el tiempo y transmite a sus descendientes sus inclinaciones, o utilizando el vocabulario de Polanyi, sus condiciones de frontera, marcando así cierta dirección.

Afirma Simon, al igual que lo hace Bertalanffy, que los sistemas complejos no son energéticamente cerrados, por lo que la termodinámica clásica no sirve para deducir su dirección.

Se puede llegar a comparar la evolución con el proceso de solución de problemas. Al igual que éste, la evolución procede por ensayo y error, para después seleccionar los ensayos exitosos. Se prueban ciertos caminos, de entre los cuales los más fructíferos se marcan y seleccionan, para continuar el proceso a partir de ellos. Estos caminos fructíferos no serían

sino los niveles intermedios estables, a partir de los cuales se siguen construyendo los sistemas complejos. Estos niveles intermedios se seleccionarían según un doble criterio:

- En primer lugar, por las consecuencias que poseen: los niveles más estables hacen que el organismo sobreviva.
- En segundo lugar, por la experiencia previa: las características se heredan.

Si la evolución de ciertos elementos simples a un constructo complejo es lo suficientemente probable, esta evolución se repetirá. Además, la creación de un sistema complejo particular aumenta las probabilidades de creación de otro del mismo tipo, si es que éste consiste en una forma estable. Se da entonces, según Simon, cierta relación entre lo estable y lo probable: lo probable se da más, y por ende tiende a reproducirse más.

Este último pensamiento parece chocar de forma frontal con la idea común de que el orden, la aparición de estructuras, es menos probable que el desorden. (Ver sección .1.) Dejando esto a un lado, la tesis principal de Simon resulta esencial para un estudio ontológico de los sistemas complejos: éstos, por razones de economía, hacen gala de una estructura jerárquica. Como los sistemas jerárquicos tienen ciertas propiedades en común, una teoría de los sistemas complejos pasaría por un estudio de la jerarquía.

### 2.2.5. Ciencia y complejidad

Junto a la reflexión sobre los propios sistemas complejos, también suele darse aquella que trata con las implicaciones que este concepto tiene para las disciplinas científicas existentes. Es decir, cómo se relacionan las ciencias ya establecidas con esta nueva forma de abordar algunos fenómenos de la naturaleza que, en ocasiones, parece contradecir en cierto sentido lo que ya se daba por hecho, por ejemplo, acerca de la termodinámica o de la importancia del método analítico. En *Science and complexity* de Warren Weaver (Weaver 1948) tenemos un ejemplo de los comienzos de este tipo de reflexión.

Para este autor existen básicamente tres tipos de problemas: de simplicidad, de complejidad desorganizada y de complejidad organizada. Los problemas de simplicidad implican un pequeño número de variables, y de ellos se ha ocupado la ciencia hasta el momento. Por otra parte, los problemas de complejidad desorganizada implican miles de variables y son susceptibles de ser tratados estadísticamente. Al ser el comportamiento de cada variable errático, se pueden calcular ciertas propiedades medias del conjunto. Este método puede ser aplicado a situaciones en las que se desconozca parcial o totalmente el comportamiento de los individuos aislados. Por último, nos encontramos con los problemas de complejidad organizada. Weaver afirma que aún no han sido tratados por la ciencia como tales, pero habrán de serlo. El factor clave en estos problemas es la organización: las variables se hallan interrelacionadas formando un todo orgánico.

Las claves que Weaver propone para tratar en el futuro con este tipo de problemas son dos: computación e interdisciplinariedad. Dada la creciente capacidad de cómputo

de los ordenadores, éstos pueden resultar de extrema utilidad para tratar con modelos complicados, interconectados y que requieran muchas operaciones. Además, la colaboración entre los distintos campos de estudio es necesaria para el tratamiento de este tipo de problemas, pues no pertenecen, por así decir, a una única disciplina, sino que se encuentran en la confluencia de varias.

De hecho, estos dos fenómenos, el de los modelos por computador y la colaboración entre disciplinas, son los mismos a los que sigue apelando hoy a la hora de tratar con los estudios sobre complejidad. Asimismo, también se suelen distinguir los problemas sobre lo complejo de aquéllos que se tratan analíticamente (pocas variables) o de los que se resuelven estadísticamente (gran cantidad de variables).

### 2.2.6. Teoría general de los sistemas

En su *Teoría general de los sistemas* (Bertalanffy 2007), de 1969, Von Bertalanffy expone por primera vez de forma extensa su pensamiento acerca del tema, que venía desarrollando desde antes de la guerra y había presentado ya de forma parcial en artículos como *An outline of general system theory* (Bertalanffy 1950) o *General system theory: a new approach to unity of science* (Bertalanffy 1951). A primera vista, debido al vocabulario empleado, podría no parecer una obra acerca de sistemas complejos o complejidad. Sin embargo, un examen algo más profundo revela la obra como una gran síntesis del pensamiento acerca de lo complejo hasta el momento en que se escribió. Bajo el rótulo de «sistemas» engloba un tipo de entidad muy concreta que comparte muchas de las propiedades que se le han venido atribuyendo a los sistemas complejos, sistemas complejos adaptativos, complejidad organizada, etc. Desde un enfoque inclinado hacia la biología, Bertalanffy propone toda una línea de investigación basada en la siguiente premisa básica: todos los sistemas tienen una estructura común, cuyo estudio puede ser el comienzo de la elaboración de una teoría general.

En la definición de sistema dada por Bertalanffy (ver pág. 7) 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 2007, págs. 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 2007, pág. 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 2009, págs. 109-10)

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 2007, pág. 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 2007, pág. 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 2007, 55 y ss.) En un sistema lineal, la suma de dos soluciones también es una solución (lo que se conoce como principio de superposición (Ladyman, Lambert y Wiesner 2013, pág. 4)); en un sistema no lineal, este principio no se cumple (ver sección 8.2.1).

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 2007, pág. 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 2007, pág. 43), o dicho de otra forma, 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 2007, pág. 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 «autoconstrucción». En definitiva, estos sistemas exportan entropía e importan orden.<sup>4</sup>

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 2007, pág. 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 aumento del orden (Bertalanffy 2007, pág. 147), pero sin contradecir la termodinámica (Íb., pág. 150), pues es necesario un gasto energético para mantener el estado uniforme. (Íb., pág. 153)

El aumento del orden en los sistemas abiertos lleva parejos otros procesos, que son los que dan lugar a las llamadas disposiciones fijas (Bertalanffy 2007, págs. 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 2007, pág. 74), que no sería sino un centro de referencia de los procesos de intercambio de materia y energía. (Íb., pág. 75)

---

<sup>4</sup>Pueden encontrarse ideas similares en Prigogine 2006.

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 2007, pág. 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). (Íb., pág. 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 autodirigido. Este tipo de mecanismos se ciñe al esquema presentado en la figura 2.1, que aparece en Bertalanffy 2007, pág. 43.

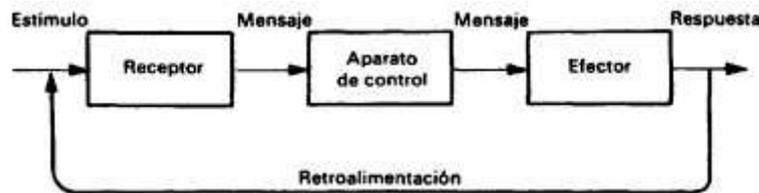


Figura 2.1: Esquema de realimentación de Bertalanffy

En este esquema se puede observar cómo parte de las salidas vuelve 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 provocará 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 2007, pág. 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. (Íb., pp. 20 y 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 2007, pág. 15 )<sup>5</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 2007, pág. 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.»<sup>6</sup> (Íb., pág.79)

Bertalanffy distingue varios tipos de teleología (Bertalanffy 2007, págs. 80-1):

- 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.

---

<sup>5</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>6</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 Bertalanffy 2007, 59 y ss.

- Dinámica: se distingue de la anterior en que hay directividad, o sea, progresión de sucesos. Posee varios subtipos:
  - Dirección de acontecimientos hacia un estado final como si el comportamiento dependiera de ese estado final.
  - 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.
  - 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.» (Bertalanffy 2007, págs. 137-8)
  - Intencionalidad: la meta futura está presente en el pensamiento del que actúa.

### 2.2.7. *Autopoiesis*

Al igual que Bertalanffy, Maturana y Varela centraron su atención en la «autocreación» del sistema, en la sustitución de elementos que mantiene la estructura. 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 2003, pág. 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 2003, pág. 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 2003, pág. 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 aquéllas 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 2003, pág. 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.» (Maturana y Varela 2003, pág. 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.» (Íb., pág. 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 2003, págs. 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 2003, pág. 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 2007, págs. 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. (Íb., pág. 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, el carácter discreto y la 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.

### 2.3. Las 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 (Mitchell 2009, págs. 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:

- Comportamiento colectivo: los agentes, siguiendo reglas simples, logran un comportamiento complejo sin necesidad de control central.

- Procesamiento de señales e información: los agentes producen y usan información proveniente tanto de sus medios externos como internos.
- Adaptación: los agentes cambian su comportamiento para incrementar sus posibilidades de supervivencia.

### 2.3.1. El modelo *Echo*

El modelo Echo propuesto por Holland en su libro *El orden oculto* proporciona una excelente base para comenzar a definir de forma rigurosa los fenómenos complejos. Este modelo consta básicamente de tres elementos: una variedad de 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 2004, págs. 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:

- si los detectores reciben un mensaje válido (M), entonces envían un determinado mensaje (M1) a los efectores
- si los efectores reciben un mensaje (M1), 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 2004, pág. 62)

La figura 2.2 ilustra las relaciones entre el agente, los mensajes y el medio.<sup>7</sup>



Figura 2.2: Sistema de transmisión de mensajes basado en reglas

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 2009, págs. 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.

<sup>7</sup>Imagen tomada de Holland 2004, pág. 62.

La asignación de crédito (Holland 2004, págs. 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 nuevas reglas (Holland 2004, págs. 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 2004, págs. 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 a los agentes relacionarse entre sí para poder estudiar las dos características básicas de los sistemas complejos adaptables: 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:

- 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 definen la complejidad desaparecieran, 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 López 2013, págs. 260-3)

- 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).
- 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>8</sup>) y formas más complejas (resoluciones de problemas matemáticos, gobierno de una población).

### 2.3.2. Johnson y el *feedback*

En *Simply complexity* (Johnson 2009, págs. 13-6) encontramos una lista algo rapsódica de los ingredientes que los sistemas complejos –si no todos, muchos de ellos– deben tener para considerarse tales:

1. Contienen 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 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.

---

<sup>8</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.

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 2009, págs. 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 2009, págs. 25-6)

El siguiente ejemplo (basado en Johnson 2009, págs. 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 2009, pág. 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<sup>9</sup>. 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 2009, pág. 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 2009, pág. 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?

---

<sup>9</sup>Que dice que la entropía, es decir, la cantidad de energía que ya no puede ser convertida en trabajo, siempre crece (ver sección .1 del anexo).

Para explicarlo, se puede seguir utilizando el ejemplo de la oficina, pero esta vez, en lugar de un ayudante descuidado, tendremos uno sistemático. (Johnson 2009, págs. 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 2009, pág. 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.

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 2009, pág. 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. (Íb., págs. 63-5)

### 2.3.3. Holland y los sistemas complejos adaptables

A través del modelo *Echo*, como se ha visto, 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. *El 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 conviertan en conocimientos más profundos. (Holland 2004, págs. 20-1)

Las siete características principales de los SCA (sistemas complejos adaptables) las constituyen lo que Holland llama «Los siete básicos» (Holland 2004, págs. 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 (Íb., pp. 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 (Íb., pp. 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 la cuestión de la emergencia.

Los flujos (Íb., pp. 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 (Íb., pp. 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». (Íb., pp. 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 (Íb., pp. 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». (Íb., pp. 30) Por ejemplo, por el olor, un lince puede reconocer al conejo como una presa, y al lobo como un enemigo.

Los modelos internos (Íb., pp. 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 (Holland 2004, págs. 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.» (Íb., pág. 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.

#### 2.3.4. Kauffman

En la que se podría considerar su obra más importante, *The origins of order* (Kauffman 1993), Kauffman trata de introducir la idea de autoorganización en la teoría evolucionista. Al preguntarse por los orígenes del orden en el reino biológico, el autor ve insuficiente el mecanismo de la selección natural. Es decir, que si se quieren explicar las estructuras que la evolución ha introducido en los organismos, se han de sumar, a la selección natural, las propiedades de los sistemas autoorganizados. Estas propiedades serían universales, y por lo tanto su estudio podría dar lugar a enunciados legaliformes, una suerte de «leyes de los sistemas complejos». Resulta imposible hacerse cargo de una obra de tal envergadura en esta sección, la cual quedará relegada principalmente al estudio de la primera parte, en la que se presentan, por así decir, los fundamentos teóricos. En las dos partes siguientes se aplican las hipótesis, teorías y modelos a ciertos casos particulares de la biología, como la ontogénesis o el origen de la vida.

Una de las ideas centrales de la obra consiste en que la selección natural actúa sobre los sistemas autoorganizados:

The essential idea is simple. It is to think of selection as acting on systems that spontaneously exhibit some particular form of order that is typical of an entire class of similar systems, called an ensemble. Selection can be thought of as moving a “population cloud” to particular parts of that ensemble. The balance between the self-organized properties typical in the ensemble and selection then depends upon the extent to which selection can move the population cloud to parts of the ensemble which no longer exhibit the typical order. The critical point we shall find is this: in sufficiently complex systems, selection cannot avoid the order exhibited by most members of the ensemble. Therefore, such order is present not because of selection but despite it. This implies that the kinds of collective self-organization which we will discuss in the remainder of the book can reasonably be expected to account for some of the order exhibited by organisms. (Kauffman 1993, pág. 16)

Kauffman sugiere que muchas de las propiedades de los organismos emergen de colectividades interactuando. Por tanto, estudiar los principios de la autoorganización ayudaría a comprender algunas de esas propiedades. De la misma forma que, como se ve en la mecánica estadística, los sistemas tienden a pasar más tiempo en ciertos volúmenes del espacio de fases, los cuales suponen los estados más probables, los sistemas autoorganizados tienden a conservar sus propiedades típicas a pesar de la acción de la selección. La selección produce modestos desplazamientos de las propiedades emergentes típicas de una familia de sistemas. (Kauffman 1993, págs. 23-25) De esta forma, no se tendría por qué recurrir al reduccionismo para explicar algunas características biológicas, puesto que se estudiarían a través de estas leyes universales de los sistemas complejos autoorganizados.

En su tesis central, Kauffman afirma que los sistemas autoorganizados alcanzan su cota máxima de adaptación cuando se encuentran en un estado denominado «borde del caos» (*edge of chaos*). Para comprender esta afirmación, común en la literatura sobre complejidad, es necesario estudiar el concepto de «horizonte de adaptación», así como alguno de los modelos lógico-matemáticos que se utilizan a la hora de estudiar las propiedades de los sistemas autoorganizados.

Suponiendo que cada genotipo tiene una adaptación, la distribución de estos valores en el espacio de genotipos constituye el horizonte de adaptación. (Kauffman 1993, pág. 33) En general, un horizonte de adaptación será cualquier propiedad bien definida y su distribución a través del conjunto. Por ejemplo, la idoneidad de ciertas enzimas como catalizadores de una reacción química. (Kauffman 1993, pág. 37) La evolución, por tanto, quedará representada como el avance de un conjunto de valores en dicho horizonte. Estos movimientos son denominados «escaladas». Si la selección que guía a esta población genotípica es débil, las propiedades sistémicas serán comunes, es decir, no tendrá la fuerza suficiente para modificar las propiedades provenientes de la autoorganización. Por tanto, según crece la complejidad de los sistemas, la selección se va viendo cada vez más limitada. Se denomina «catástrofe de complejidad» al fenómeno que tiene lugar cuando

esta complejidad limita la acción de la selección de forma muy severa de manera que se mantienen las propiedades sistémicas.

Según el número de partes y la interdependencia que exhiban, las catástrofes de complejidad suceden de diferentes maneras:

- Cuando las partes son independientes, la catástrofe de complejidad sucede al sobrepasar un número crítico de ellas.
- Cuando las partes son dependientes entre sí, aparecen constreñimientos adaptativos que hacen aparecer picos en el horizonte, quedando la adaptación confinada a pequeñas regiones del espacio.

Para estudiar estos horizontes, Kauffman presenta el modelo  $NK$ . En él,  $N$  representa el número de elementos o partes del sistema y  $K$  el nivel de interdependencia entre dichas partes. (Kauffman 1993, pág. 40) Este modelo funciona como una suerte de mecánica estadística de los horizontes, estudiando las propiedades esperadas de los sistemas. Los horizontes pueden ser suaves o escabrosos (*rugged landscapes*). Un horizonte suave es aquél en el que los puntos vecinos tienen más o menos el mismo valor de adaptación; por su parte, uno escabroso tiene unos valores de adaptación poco correlacionados (dando lugar a grandes picos y valles). Estas propiedades pueden definirse en función del valor de  $K$ :

- $K = 0$  corresponde a un horizontes sin interacciones, es decir, suave.
- $K = N - 1$  corresponde a un horizonte en el que hay total interdependencia. Estos horizontes poseen las siguientes propiedades:
  - El número de óptimos locales de adaptación (los mejores valores de adaptación de un subconjunto del horizonte) es muy grande.
  - La fracción esperada de variantes más adaptadas de una sola mutación disminuye  $1/2$  a cada paso.
  - Las longitudes de los caminos adaptativos hacia los óptimos son muy cortos y aumentan solo como una función logarítmica de  $N$ .
  - El número de mutantes que intentan alcanzar un óptimo es proporcional a la dimensionalidad del espacio.
  - El ratio entre mutaciones aceptadas e intentadas es  $\ln(N)/N$  para el caso de dos alelos.
  - Cualquier genotipo puede escalar hacia solamente una pequeña fracción de óptimos locales.
  - Solo una pequeña fracción de los genotipos puede escalar a cualquier óptimo.
  - Según aumenta el número  $N$  de lugares genéticos, los óptimos locales caen hacia la media de adaptación del espacio de genotipos. Es decir, los óptimos locales

se hacen más pobres (Kauffman 1993, pág. 52) y ésta es una limitación que no puede ser superada. (Kauffman 1993, pág. 54)

Según lo dicho, el requisito para que un sistema complejo sea mejorable por selección consistiría en mantener  $K$  relativamente bajo y  $N$  alto, de forma que queden los óptimos locales altamente accesibles. En resumen, la forma en que la selección actúa, y por ende la evolución avanza, está influida por las propiedades sistémicas de las entidades en cuestión sobre las que trabaja, y estas propiedades dependen de la estructura de la entidad:

- Si ésta tiene partes muy independientes, es difícil que una mutación afecte al conjunto y que la selección la mantenga.
- Si, por el contrario, tiene partes muy codependientes, se crean constreñimientos de los que es difícil escapar.

La selección actuará mejor, por tanto, en una especie de punto intermedio entre ambas situaciones.

A lo largo de la obra se hace uso del lenguaje de la teoría de sistemas dinámicos. Según lo presenta Kauffman, un sistema dinámico es (Kauffman 1993, págs. 175-179):

- Un sistema de ecuaciones diferenciales, el cual
- se representa en un espacio de estados tridimensional.
- Una sucesión de puntos unidos (estados) forma una trayectoria del sistema. Sólo una trayectoria pasa por todos los puntos. Dos estados que pertenecen a trayectorias distintas siempre pertenecerán a trayectorias distintas.
- La estabilidad es la propiedad de los sistemas que hace que queden confinados en un volumen determinado del espacio de estados, sin cambios dramáticos.
- Un atractor es un conjunto de puntos o estados en el espacio de estados hacia al cual las trayectorias dentro de algún volumen de dicho espacio convergen asintóticamente a lo largo del tiempo. El volumen de estados que pertenecen a trayectorias que fluyen hacia un atractor se denomina cuenca de atracción.
- Los atractores constituyen comportamientos a largo plazo del sistema.
- Existen varios tipos de atractores:
  - Ciclo límite: hacen que el sistema quede atrapado en un *loop*.
  - Toroidal: que conforma un *loop* en forma de *donut*, en el que hay dos direcciones posibles: a lo largo del borde, o atravesando el agujero central.
  - Caótico: muestra una gran sensibilidad a las condiciones iniciales, por lo que dos trayectorias inicialmente muy juntas pueden terminar en lugares muy alejados.

Los sistemas biológicos tienen unas características peculiares. En primer lugar, las reglas que gobiernan un elemento (enzima, neurona, anticuerpo, etc.) no son las mismas que gobiernan los demás. En segundo lugar, se trata de sistemas termodinámicamente abiertos, es decir, que intercambian energía con el entorno. Además, son sistemas que no pueden moverse aleatoria y ergódicamente<sup>10</sup> por su espacio de posibilidades. Por último, sufren mutaciones aleatorias. Estas características hacen que no se puedan tratar con las herramientas habituales, siendo necesario el desarrollo de una mecánica estadística:

What we need, therefore, is a new kind of statistical mechanics, one which analyzes the properties of ensembles of complex systems with very many coupled elements. By understanding the characteristic structure and behaviors of the members of such ensembles, we may be able to understand both the emergence of order in organisms and its adaptive evolution. This section develops aspects of such a new statistical mechanics. (Kauffman 1993, pág. 182)

A este respecto, las redes dinámicas *booleanas* resultan esenciales para el desarrollo de dicha mecánica, puesto que serían capaces de captar las principales propiedades de los sistemas dinámicos continuos. Este tipo de redes se comporta de la siguiente manera:

- Están compuestas de variables binarias.
- La dinámica de cada una de estas variables (si está encendida o apagada en el siguiente instante) está regida por lo que se denomina reglas lógicas o funciones *booleanas*.
- Si el sistema no recibe inputs de fuera, se considera autónomo.
- Si todas las variables se actualizan a la vez, se considera síncrono.
- Al igual que el resto de sistemas, puede ser estable o inestable, poseer atractores, sufrir perturbaciones, etc.

Kauffman aventura que un sistema complejo pasa la mayor parte del tiempo en los atractores, y el resto de estados son visitados mientras se cambia entre dichos atractores. (Kauffman 1993, pág. 191) Además, el estado en el que la selección es más efectiva, es el estado de orden cercano al caos. (Kauffman 1993, pág. 192) Estas propiedades pueden ser estudiadas a través de las redes binarias, puesto que permiten realizar idealizaciones sobre sistemas gobernados por funciones sigmoidales:

In summary, logical switching systems capture major features of a homologous class of nonlinear dynamical systems governed by sigmoidal functions because such systems tend to sharpen their responses to extremal

---

<sup>10</sup>Un sistema ergódico es capaz de expandirse por todos los puntos de su espacio de fases a lo largo del tiempo.

values of the variables. The logical networks can then capture the logical skeleton of such continuous systems. However, the logical networks miss detailed features and in particular typically cannot represent the internal unstable steady states of the continuous system. Thus Boolean networks are a caricature, but a good one, a powerful idealization with which to think about a broad class of continuous nonlinear systems as well as switching systems in their own right. (Kauffman 1993, pág. 188)

Aplicando el modelo  $NK$  sobre este tipo de redes, se pueden observar los distintos fenómenos que surgen a partir de la estructura de la red, siendo  $N$  el número de elementos y  $K$  la media de inputs de cada uno de ellos. En redes  $NK$  aleatorias, se puede observar:

- Cuando  $N = K$ 
  - La sensibilidad a las condiciones iniciales es máxima
  - La longitud de los atractores caóticos aumenta exponencialmente según aumenta  $N$
- Hay una transición de fase hacia el orden entre  $K > 2$  y  $K = 2$ . Cuando  $K = 2$ 
  - La red exhibe un alto grado de orden
  - El sistema se confina en un pequeño volumen del espacio de estados
  - Aumenta la resistencia al daño
  - Se da la tendencia a producir la misma respuesta ante diferentes estímulos
- En  $K = 1$  se crea una estructura modular, compuesta de *loops* funcionalmente aislados, que no pueden influirse entre ellos

La condición suficiente para que aparezca esta transición de fase hacia el orden es la percolación de *clusters* estáticos (*frozen*). Es decir, que aparece un núcleo estático, conformado por un conjunto de variables unidas que no cambian de estado, el cual atraviesa grandes zonas de la red, dividiendo ésta en módulos dinámicos separados. En esta estructura «núcleo/isla» las mutaciones no se extienden (pues se quedan en las islas) y por ello estas redes se adaptan en horizontes altamente correlacionados (es decir, suaves). Por el contrario, las redes caóticas se adaptarán mejor en horizontes no correlacionados (escabrosos). En general, los horizontes escabrosos constriñen la evolución. (Kauffman 1993, pág. 209)

La evolución en los sistemas dinámicos puede verse como un camino en el espacio de parámetros. Las variables esenciales son las que han de ser mantenidas dentro de ciertos límites. A lo largo de este camino, se dan saltos entre los sucesivos atractores hasta que se encuentra uno que mantenga dichas variables dentro de los límites. Por lo tanto, la adaptación se da respecto de un «patrón-meta» que se persigue. Anteriormente se afirmó

que es la transición entre el orden y el caos el estado en el que mejor puede actuar la selección natural. Pero el fenómeno no se detiene simplemente ahí, y es que es la propia selección, afirma Kauffman, la que empuja a los sistemas complejos a este estado, a este punto en el que se pueden optimizar mejor las tareas que se tienen como meta y se favorece la evolución:

Parallel-processing systems lying in this interface region between order and chaos may be those best able to adapt and evolve. Further, natural selection may be the force which pulls complex adaptive systems into this boundary region. If so, we begin to have a powerful tool with which to examine the collaborative interaction between self-organization and selection. (Kauffman 1993, pág. 218)

En términos de computación, tanto una red caótica como una estática, procesan pocos datos. La zona más fructífera en estos términos se da entre el orden y el caos, pues en este estado, pese a la existencia de islas, éstas son capaces de comunicarse entre sí. (Kauffman 1993, pág. 221) Kauffman propone entonces que esta tendencia a permanecer entre el orden y el caos podría ser una especie de propiedad universal de los sistemas complejos:

if genomic systems of plants to animals, separated for the past 600 million years, are all poised near the edge of chaos, then we would virtually have to conclude that selection has achieved such a poised state. If true, this finding would provide striking evidence that parallel systems with nearly melted frozen components possess the construction requirements which permit complex systems to adapt. Hence such features might be quasi-universals in complex adaptive systems. (Kauffman 1993, pág. 227)

Por el contrario, los sistemas en el régimen ordenado o caótico probablemente no son capaces de comportamiento complejo ni evolutivo.

# Capítulo 3

## Puesta en común y crítica de la complejidad

Tomando como punto de partida las principales ideas acerca de los sistemas complejos expuestas en el capítulo anterior, se podría llevar a cabo una comparación entre las visiones de los distintos autores, lo cual permitiría al menos dos cosas:

Primero, enumerar y aclarar todos los conceptos que se han introducido y que se emplean en el estudio de los sistemas complejos. Esto permitirá ofrecer una visión más o menos unitaria de éstos, lo cual, además de ayudar a su comprensión, redundará directamente sobre el segundo punto.

Segundo, a través de los conceptos clarificados, se podrán resaltar los problemas que plantean, no solamente los sistemas complejos y el fenómeno de la complejidad, sino las propias ideas a las que estos conceptos hacen referencia, las cuales, aunque de uso común, distan mucho de la claridad que cabría desear. De esta manera, los problemas y fricciones puestos de relieve podrán ser tratados en capítulos posteriores a través de las herramientas conceptuales que se desarrollarán.

### 3.1. Un esquema ontológico básico

Haciendo uso de algunas de las ideas expuestas por Bertalanffy en *Teoría general de los sistemas*, se puede elaborar un esquema de referencia que permita comparar las diferentes visiones aportadas por cada autor estudiado, con el fin de clarificar el concepto de complejidad y poder determinar si es posible obtener algo así como un sentido más o menos unitario del mismo. De la gran cantidad de temas y problemas que Bertalanffy propone, los principales podrían quedar ordenados de esta manera:

- Autorregulación:
  - Regulaciones primarias: apertura

- metabolismo, mecanización, centralización, individuación
- Regulaciones secundarias: retroalimentación
- Teleología
  - estática
  - dinámica (equifinalidad, intencionalidad, por estructura, por estado final)
- Composición:
  - Comportamiento grupal, interacción, información
  - Emergencia
  - No linealidad
  - Jerarquía

Bertalanffy 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 «composición». 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>1</sup>; además, los distintos niveles de emergencia suelen organizarse de forma jerárquica, como ya sugería Simon y se estudiará a través del concepto de nivel.

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

---

<sup>1</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 para ello es necesario un sistema de desempeño compuesto de reglas, sensores y efectores (tengan éstos la forma que sea). De este modo, el agente es un sistema formado por reglas, sensores y efectores. Si se quita uno de estos elementos, ya no se tiene un agente. Estas consideraciones acerca de todos y partes cobrarán un sentido más preciso en el capítulo dedicado a la mereología.

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 composición. 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.

### 3.2. Dos visiones, un tipo de sistema

La mayoría de autores estudiados habla de intercambios de información y energía con el medio, así como del carácter abierto de los sistemas, tratando incluso el tema de la exportación de entropía; sin embargo, parece que no todos abordan el tema a la manera de Bertalanffy, Maturana y Varela, es decir, desde el punto de vista de la autoconstitución (o *autopoiesis*) del sistema. Esta situación puede ser debida a cierto choque entre dos visiones: una más influida por la biología y otra quizá más inclinada hacia la física. Por ejemplo, se ha visto que Kauffman se centra de manera exclusiva en la teoría de la evolución biológica y cómo podría completarse a través de las propiedades de los sistemas complejos. En primer lugar, asume que estos sistemas son compuestos de una multiplicidad de partes ( $N$ ) que tienen una alta correlación entre ellas ( $K$ ), lo que hace posible la autoorganización (que estamos englobando aquí bajo el rótulo de autorregulación), la cual da lugar a propiedades sistémicas peculiares de cada familia de sistemas. Sobre estas propiedades ejerce su fuerza la selección natural, cuya naturaleza no ha sido del todo aclarada, pero se entiende como otro mecanismo emergente debido al dinamismo de los sistemas; en concreto, podría considerarse que consiste en la posibilidad de que los entes biológicos, dadas sus características, persistan o perezcan según las relaciones que mantienen con lo que les rodea.

Tómese un ejemplo algo más alejado del reino biológico, como un atasco de tráfico. La disparidad de velocidades, los frenazos, los accidentes, etc. dan lugar a un patrón grupal de comportamiento de los vehículos, en los que el movimiento del conjunto es muy limitado. Se tiene composición y autorregulación (pues el movimiento de los coches procede de las propias relaciones que guardan entre ellos, y no de algo exterior). Pero, ¿se trata de un sistema complejo en el mismo sentido en que lo es un ente biológico? En un atasco, las partes de los coches deterioradas no se sustituyen intercambiando energía con el entorno. A lo sumo, se intercambia información. Tampoco parece que las dinámicas de los coches, ni los coches mismos, estén sujetos a selección natural, a no ser en un sentido algo torcido.

Quizá la resolución del dilema pase por aclarar la noción de autorregulación, entendiendo por ésta, como se ha venido haciendo, algo similar a autoorganización, a saber: un producto de la emergencia. No se puede identificar por completo con la emergencia, puesto que no toda propiedad emergente otorga autorregulación (por ejemplo, emergencias en sistemas estáticos), y por ello conviene entenderla como una consecuencia posible de ésta. De las dinámicas que emergen de la interacción entre partes del sistema, puede que una de ellas afecte al comportamiento o la integridad del propio sistema. En este sentido, tanto en

el atasco como en el cuerpo humano existe autoorganización. Sin embargo, se ha visto que autores como Bertalanffy o Kauffman ponen el acento en la apertura termodinámica, es decir, el intercambio de energía con el medio, cosa que no hacen, o al menos no en el mismo sentido, automóviles y células. De hecho, ambos autores parecen opinar que dado que las leyes de la termodinámica se centran más bien en los sistemas cerrados, lo que incumbe al estudio de los sistemas complejos es algo así como una mecánica de los sistemas abiertos.

Dada esta situación, se tienen dos opciones. O bien se asume una noción amplia de sistema complejo, y otra estricta que se refiera a los sistemas biológicos, o se postula que hay dos tipos de sistemas complejos. Si se opta por la segunda opción, se puede aceptar que sean heterogéneos, o que uno sea consecuencia del otro. Dado que ambos tipos de sistemas compartirían la autorregulación, y que los mecanismos de las regulaciones primarias o *autopoiesis* no parecen ser sino un tipo particular de ésta última, parece que hay razones para preferir un concepto unitario de sistema complejo dentro del cual se pueda distinguir, al menos, un tipo especial (y seguramente más en posteriores investigaciones).

En definitiva, es muy probable que los autores estudiados se estén refiriendo siempre al mismo tipo de fenómenos, salvo que con ciertas diferencias de enfoque. Los conceptos que manejan supondrán entonces una buena base para comenzar un estudio ontológico de la complejidad. Éstos, lejos de ser asumidos acríticamente, serán diseccionados en los capítulos venideros para comprobar su coherencia, y finalmente estudiados en su adecuación a la hora de ser aplicados a sistemas complejos reales a través de ejemplos provenientes de diversos campos.

### 3.3. Los conceptos de los sistemas complejos

En síntesis, y pese a las posibles disputas acerca de la naturaleza de lo complejo debidas a diferencias de enfoque, se podría decir que la mayoría de estudiosos de los sistemas complejos emplean los siguientes conceptos para referirse a los distintos fenómenos en los que radica la peculiaridad de este tipo de sistemas:

- **Dinámica basada en agentes y reglas:** los componentes básicos de un sistema complejo son elementos que actúan, produciendo cambios en su entorno y en sus iguales. La manera de actuar de estos elementos está regida por unos patrones, de manera que no es –o al menos no completamente– azarosa. Dicho de otra forma, los componentes de un sistema complejo no pueden ser estáticos en su totalidad, sino que al menos una fracción ha de ser dinámica y capaz e interactuar entre sí.
- **Emergencia:** las interacciones que se acaban de mencionar producen, a su vez, otros comportamientos o propiedades globales que no se observan en los elementos aislados.
- **Niveles y jerarquía:** tras lo dicho, queda implícita una idea que suele ser apoyada de una forma u otra: los agentes y la emergencia se dan en diferentes planos o niveles

de existencia. Así, se tienen células que forman un tejido o abejas que forman un enjambre.

- Autorregulación u autoorganización: la idea de que un sistema complejo se organiza sin necesidad de un control central se podría considerar la característica más reseñable. Las interacciones, la emergencia y las jerarquías desembocan en la capacidad para mantener un cierto orden interno, a costa de un intercambio con el medio circundante que implica información, materia o ambas.

### 3.4. Conclusiones: los problemas de la complejidad

Los fenómenos de emergencia, niveles, autorregulación, etc., pese a ser encontrados de forma constante en los estudios sobre sistemas complejos, parecen aún muy lejos de estar aclarados. No son oscuros simplemente respecto de su significado sino que, además, una vez se ha atisbado éste, se sigue sin comprender del todo cómo funcionan de manera fundamental, es decir, cuál es su ontología.

En primer lugar, la idea de que los componentes actúen siguiendo reglas simples, en autores como Bertalanffy o Kauffman, parece retrotraerse a la teoría de sistemas dinámicos, en cuyo caso habría que establecer qué es un sistema, qué es la dinámica de un sistema y qué es su espacio de estados. Mas allá de cómo se modela un sistema dinámico a través de ecuaciones diferenciales, no se tiene una definición exacta de sistema, en la que se exponga de forma clara cuáles son sus componentes y cómo se comportan. Otros autores, como Holland, ofrecen un desarrollo computacional que opera con agentes, pero se sigue sin tener un claro mapa ontológico de estas entidades.

En definitiva, desde un punto de vista ontológico, se desearía responder a las siguientes cuestiones:

- Qué es ser un sistema
- Qué es ser el componente de un sistema
- Qué tipo de relaciones existen entre el sistema y sus componentes
- Qué tipo de realidad tiene un sistema, y qué estatuto tendrían las propiedades de un sistema respecto de los componentes de éste

Muy cercanos a los problemas sobre la realidad sistémica se encuentran, en segundo lugar, los problemas que acarrea la idea misma de emergencia. En torno a ésta existe un antiguo debate sobre su naturaleza misma: por una parte, hay quienes afirman que las entidades emergentes lo son por derecho propio, y no son reducibles a las entidades pertenecientes al nivel respecto del que emergen; por otra parte, están los que sostienen que la emergencia es simplemente el fruto de nuestra incapacidad para comprender a fondo un fenómeno, y si se pudieran establecer todas las variables y relaciones, esta porción de la

realidad sería perfectamente explicable a través de sus elementos más simples, sin necesidad de apelar a entidades nuevas.

Además, existe el problema en torno a la causación descendente, derivado directamente del problema de la emergencia. Éste podría enunciarse así: si lo emergente es novedoso respecto de lo físico, se podría tratar por tanto de algo no físico, y si se admite que esta entidad novedosa puede afectar a los elementos del nivel inferior (causación descendente), se admitiría que algo no físico tiene efectos sobre lo físico, acarreando graves problemas respecto de las leyes físicas aceptadas.

Por tanto, respecto de la emergencia y la causación descendente parece necesario tratar de responder, al menos, a las siguientes cuestiones:

- Qué significa que una entidad sea emergente
  - Estudiar si se puede ofrecer una definición positiva de la emergencia que no se limite a la irreducibilidad (ya sea ontológica o epistémica)
- Qué estatuto ontológico tiene lo emergente
- Si pueden emerger propiedades, objetos, estructuras, relaciones o procesos; todos ellos, algunos o ninguno
- Si puede haber varios tipos de emergencia, o todas han de ser fuertes (irreducibles) o débiles (reducibles)
- Qué diferencia existe exactamente entre la emergencia fuerte y la débil: a qué se refieren cuando hablan de reducción
- Qué significa que una entidad superior cause o afecte a una inferior y si en todo caso e interpretación la idea de causación descendente es irreconciliable con la visión científica del mundo

En tercer lugar, puede apreciarse que hay una noción que atraviesa todas las anteriores: la idea de nivel. Si algo es emergente, se dice, por lo general, que emerge en un nivel superior. La misma idea de causación descendente implica ya la existencia de al menos dos niveles distintos. Sin embargo, es común en la literatura observar expresiones como «nivel biológico» o «nivel físico» o «entramado de entidades regidas por unas leyes comunes», pero no una definición contundente de la idea misma de nivel. Conviene por tanto examinar las distintas perspectivas que se pueden encontrar acerca de los niveles para tratar de resolver alguna de estas cuestiones:

- Qué es ser un nivel
- Qué es pertenecer a un nivel
- Qué tipo de relación existe entre un nivel y otro, y cómo se ordenan

Por último, pero no por ello menos fundamental, se encuentran los problemas que trae consigo la idea de autorregulación. El «auto» parece hacer alusión a una entidad que, en cierto modo, puede referirse a sí misma a través de acciones que redundan en su propio estado. Además, este fenómeno se ha atribuido, ya sea por unos autores o por otros, a una amplia gama de entidades que pueblan el mundo: animales, células, especies, grupos de personas, grupos de máquinas, etc. Autores como Kauffman casi dan por hecho que la autorregulación se da, y que esto influye en el desarrollo biológico, pero no ofrecen una descripción clara de cómo surge este tipo de procesos. Esto hace necesario enfrentarse a las siguientes cuestiones:

- Qué es ser autorregulado
- Cómo es posible que aparezca de forma espontánea la autorregulación, si es que esto sucede
- Si existen varios tipos de autorregulación (como parecen sugerir las diferencias entre el enfoque biológico y el físico) o por el contrario se autorregulan de la misma manera un animal y una máquina, o simplemente, una máquina es incapaz de autorregulación

Como puede verse, todas estas cuestiones forman una intrincada red en la que cada una de ellas se relaciona prácticamente con todas las demás. Para comprender qué es la emergencia hay que comprender qué es un nivel. A su vez, para atisbar el significado de la autorregulación, habría que establecer qué tipo de realidad tiene un sistema, a la vez que se habría de adoptar una definición de dinámica. Pese a esto, las diferentes cuestiones tratarán de ser planteadas en orden para después ser puestas en relación, obteniéndose así una visión de conjunto sobre la ontología de los sistemas complejos.

En los capítulos siguientes se presentarán diversos conceptos ontológicos que podrían ayudar, en gran medida, a la hora de tratar de ofrecer una respuesta a algunas de las cuestiones que se acaban de plantear.



## Parte II

# Estudio de los conceptos ontológicos



# Capítulo 4

## Mereología

Este capítulo tiene como objetivo estudiar las versiones contemporáneas de la mereología, la rama de la ontología que se centra en el estudio de las relaciones entre todos y partes. Para ello, seguirá un orden cronológico a través de los siguientes autores:

Husserl, que en su tercera investigación, lleva a cabo un estudio de lo que denomina «teoría de los todos y las partes». Este autor enmarca la teoría de los todos y las partes dentro de la fenomenología, y además, con la intención de poder aplicarla más allá del ámbito de la conciencia pura, es decir, en el mundo externo. Junto a los conceptos de parte y todo, emplea el concepto de fundamentación, lo que le permite lidiar con la idea de partes dependientes e independientes.

Algunos años más adelante, encontramos en Lesniewski uno de los primeros intentos de formalización de la teoría de los todos y las partes, ahora propiamente llamada Mereología. Esta formalización fue llevada a cabo en lenguaje natural. Uno de sus principales objetivos parece ser la formulación de una teoría que sirva de alternativa a la teoría de conjuntos.

Aunque el trabajo de Lesniewski tuvo influencia en lógicos como Tarski, Ajdukiewicz, Lejewski, etc., parece que no ganó excesiva notoriedad hasta la aparición de *The structure of appearance*, de Leonard y Goodman. Estos dos autores toman la mereología extensional de Lesniewski y, con una formulación diferente, la emplean también para un propósito totalmente distinto: la descripción de la estructura ontológica de los objetos que pueblan el mundo, a partir de unos constituyentes básicos denominados «*qualia*».

Desde entonces, siguiendo con esta corriente «matematizada» de la mereología, se puede rastrear el desarrollo de este tipo de reflexiones hasta nuestros días a través de nombres como Simons, Smith o Fine. En los trabajos de Casati y Varzi, la mereología es formulada a través de un sistema estándar que consta de un núcleo de axiomas que puede ser ampliado con sucesivas tesis, lo cual facilita en gran medida su estudio y permite una ágil comparación entre las diferentes propuestas.

## 4.1. La tercera investigación de Husserl

### 4.1.1. Consideraciones previas sobre la independencia y las leyes puras

La idea principal de la investigación de Husserl es la existencia de dos tipos de contenidos: los abstractos (o no-independientes) y los concretos (o independientes). Como se verá en el resto del capítulo, esta distinción resulta de capital importancia a la hora de tratar de elaborar una mereología no extensional. Esta distinción «[t]rasciende luego allende la esfera de los contenidos de conciencia y se convierte en una distinción –muy importante en el sentido teorético– en el terreno de los objetos en general». (*Introducción*, Husserl 2006a, pág. 385) Es decir, es una distinción ontológica. De hecho, Husserl considera que la «teoría pura de los todos y las partes» pertenece a lo que él denomina «ontología formal». (Íb.)

Esto último significaría que la teoría de los todos y las partes se aplica a todos los objetos en general. Y esto es así porque todo objeto es o bien una parte real, o una parte posible, es decir, «existen todos reales o posibles que lo incluyen». (§ 1, Husserl 2006a, pág. 387) Sin embargo, no todo objeto ha de tener partes, por lo que nos encontramos con una nueva división entre objetos simples y compuestos. «Simple» puede decirse en más de un sentido, por lo que, estudiando el concepto de forma más profunda, la división quedaría así:

- Compuesto
- Simple
  - Que no tiene partes
  - Que no tiene partes disyuntas. Dos momentos son disyuntos cuando no tienen nada que ver en su contenido. Por ejemplo, el color rojo y el momento de color no son disyuntos; sí lo son el color y la extensión. A su vez, los momentos disyuntos (o disyuntivos) que se hallan juntos en un todo se dice que están enlazados. Estos elementos enlazados se llaman miembros del enlace. Los miembros pueden ser
    - no-independientes relativamente unos de otros
    - independientes relativamente unos de otros. Esto sucede en los todos despedazados, en los que las partes son pedazos (partes independientes) enlazados unos con otros

La elección del término «contenido» por parte de Husserl es debido a que considera que al hablar de «objetos» en el lenguaje corriente se tiende a pensar en objetos independientes. En cambio, el término «contenido» es en este sentido menos restringido, pese a tener ciertas connotaciones psicológicas. (§ 2, Husserl 2006a, págs. 388-389) Podría decirse que de forma general el concepto de contenido hace referencia a una de las tres partes esenciales del acto o vivencia intencional, que son, a saber: el carácter o cualidad, el contenido o materia

y el contenido representante (como puede verse, sobre todo, en las investigaciones cuarta y quinta). En adelante, salvo mención expresa de Husserl, se preferirá el término objeto, indicando si hiciera falta si se trata de uno dependiente o independiente.

Para acercarse a una definición más rigurosa de dependencia, Husserl comienza introduciendo los términos, empleados por Stumpf, de separabilidad e inseparabilidad. (§ 3, Husserl 2006a, pág. 390) Según este autor, dos contenidos son separables si se tiene la evidencia de que pueden existir sin nada que forme con ellos un todo, y son no-separables si sucede lo contrario. Por ejemplo, si se disminuyera la extensión de algo hasta hacerla desaparecer, desaparecería también el color, lo que quiere decir que estas partes no formarían una mera suma, sino algo inseparable.

Otra manera de expresar la idea de separabilidad es la siguiente: algo es separable cuando se mantiene idéntico aunque se varíe lo que está unido a él. Es decir, su existencia no está condicionada por otros objetos. Basándose en esta definición, Husserl presenta de forma preliminar los conceptos de independencia y no-independencia (§ 5, Husserl 2006a, pág. 394):

- Independiente: «en la naturaleza del contenido mismo, en su esencia ideal, no se funda ninguna dependencia con respecto a otros contenidos»
- No-independiente: «el sentido de la no-independencia reside en el pensamiento positivo de la dependencia. El contenido está, según su esencia, unido a otros contenidos; no puede existir si no existen con él al mismo tiempo otros contenidos»

De nuevo Husserl recalca que todos estos conceptos valen también para la esfera objetiva, sin ninguna referencia a la conciencia, justificando el uso del término «objeto» en lugar del de «contenido»:

Bastará que sustituyamos a los términos contenido y parte de contenido los términos objeto y parte de objeto (considerando el término contenido como el más estrecho y limitado a la esfera fenomenológica), y tendremos una *distinción objetiva* que quedará libre de toda referencia, por una parte, a los actos de aprehensión y, por otra parte, a cualesquiera contenidos fenomenológicos que deban ser aprehendidos. (§ 5, Husserl 2006a, pág. 394)

En orden a seguir perfilando las ideas de la dependencia, se relaciona este concepto con los de ley pura y género puro. Se ha de mencionar que para Husserl las especies son entes legítimos de la misma forma que lo son los individuos (ver por ejemplo *Introducción*, Husserl 2006b, pág. 296, en la investigación segunda) y que las leyes que rigen estas especies o esencias, al ser *a priori*, expresan lo que no puede ser de otra manera, por oposición a las leyes naturales o empíricas: (§ 7, Husserl 2006a, pág. 396<sup>1</sup>)

---

<sup>1</sup>Idea ya presentada en los *Prolegómenos a la lógica pura*: § 43, Husserl 2006b, págs. 145-146

El no-poder-existir-por-sí una parte no-independiente, quiere decir, por tanto, *que existe una ley de esencia, según la cual, en general, la existencia de un contenido de la pura especie de esa parte (por ejemplo, de la especie color, forma, etc.) presupone la existencia de contenidos de ciertas correspondientes especies puras[.] [...] [O]bjetos no-independientes son objetos de especies puras tales que con referencia a ellas existe la ley de esencia que dice que esos objetos, si existen, sólo pueden existir como partes de todos más amplios de cierta especie correspondiente.* (§ 7, Husserl 2006a, pág. 397)

En el caso de los objetos no-independientes, las leyes correspondientes a estas especies puras a las que pertenecen, los ligan a la existencia de otras ciertas especies puras; es decir, que si existe un objeto de la especie *A* (el objeto no-independiente), necesariamente tiene que existir un todo de la especie *B*, del que el objeto perteneciente a *A* sea parte. En cambio, los objetos independientes pueden unirse a todos más amplios, pero sin obligación o necesidad.

En resumen, el momento, el complemento que necesita y el todo que conforman ambos, pertenecen a especies distintas que están regidas por leyes *a priori*. Estas leyes sólo nombran especies ínfimas, (§ 10, Husserl 2006b, pág. 404) es decir, las especies bajo la cuales ya sólo hay individuos. Estas leyes hacen que ciertas partes y todos se hallen en conexiones ideales y no meramente de hecho, lo que da origen a la no-independencia. Por tanto, la distinción entre ontología formal y material, que funda la diferencia entre analítico *a priori* y sintético *a priori* se vuelve de la mayor importancia:

Conceptos como *algo, uno, objeto, propiedad, relación, enlace, pluralidad, número, orden, número ordinal, todo, parte, magnitud, etc.*, tienen un carácter radicalmente diferente de los conceptos de *casa, árbol, color, sonido, espacio, sensación, sentimiento*, que por su parte expresan algo que contiene una cosa. Los primeros se agrupan alrededor de la idea vacía de algo o de objeto en general, estando enlazados con este algo u objeto mediante los axiomas ontológicos formales; en cambio, los últimos se ordenan en torno a diferentes géneros supremos de cosas (*categorías materiales*) en las cuales arraigan *ontologías materiales*. Esta división cardinal entre la esfera de las esencias «formales» y «materiales» es lo que sirve de base a la auténtica diferencia entre *disciplinas* (o *leyes y necesidades*) *analíticas-a priori* y *sintéticas-a priori*. (§ 11, Husserl 2006a, pág. 405)

La teoría de los todos y las partes pertenece, como ya se ha dicho, a la ontología formal. Es decir, que sus conceptos giran en torno a la idea de objeto en general, o dicho de otra manera, objeto en tanto que objeto. Las ontologías materiales tratarían los objetos en tanto que pertenecen a una especie concreta con ciertas propiedades. En el ejemplo de «casa», una ontología material de las casas trataría cierto grupo de entes en tanto que caen bajo este concepto y se comportan de cierta manera (sirven de refugio, tienen techo, etc.). Pues

bien, Husserl afirma que todas las leyes de no-independencia son sintéticas *a priori*. (§ 11, Husserl 2006a, pág. 405) Se podría estar tentado a aceptar que en realidad todas las afirmaciones de una teoría como la de los todos y las partes son de la forma siguiente: «una parte no puede existir sin un todo del que sea parte (puesto que si se llama ‘parte’, es porque forma parte de algo)». Sin embargo, esto sería una simple trivialidad analítica, a la que hay que oponer los juicios basados en la esencia propia de la cosa, como «un color no puede existir sin una extensión por él cubierta». La idea queda resumida así:

Una parte, como tal, no puede existir sin un todo del que sea parte. Por otro lado, empero, decimos (con relación a las partes independientes): una parte *puede* a veces existir sin un todo del que sea parte. En esto no hay, naturalmente, contradicción. Lo que se quiere decir es que si consideramos la parte según su *íntima consistencia*, según su esencia propia, entonces veremos que lo que posee esa íntima consistencia puede ser sin un todo en el cual sea; puede ser por sí, sin enlace con otro, y entonces precisamente no es parte. La modificación y aun total anulación de los enlaces no toca para nada aquí a la propia consistencia *tal o cual* de la parte; y no quita existencia a la parte, sino que sólo anula sus relaciones, su ser parte. En partes de otra especie, sucede lo contrario; sucede que, por la peculiaridad de su consistencia, resultan impensables, si queremos pensarlas fuera de todo enlace, como no-partes. (§ 11, Husserl 2006a, pág. 406)

Como se ha dicho, la no-independencia viene de las leyes *a priori*, y éstas son leyes de esencias (o especies) que contienen la «íntima consistencia» de la cosa. Por tanto, dependerá de esta esencia el comportamiento de esta parte (u objeto) en general, lo cual no se ha de confundir con el mero análisis lingüístico del concepto «parte», el cual parece sugerir la necesidad de un todo, a la manera de las trivialidades analíticas mencionadas arriba. Es asumible que ésta sea una de las razones por las que la teoría de los todos y las partes necesite una formulación precisa, con significaciones bien acotadas, que permita llevar a cabo deducciones a la manera matemática.<sup>2</sup>

Qué sea exactamente una ley sintética *a priori* lo aclara Husserl a continuación: (§ 12, Husserl 2006a, pág. 407)

- En primer lugar, aclara el significado de ley analítica, la cual sólo contiene conceptos formales: «*Proposiciones analíticamente necesarias* [...] son proposiciones tales que su verdad es completamente independiente de la peculiaridad material de sus objetos [...] En una proposición analítica debe ser posible sustituir toda materia objetiva [...] por la forma vacía *algo*»
- A partir de esta definición, se desprende la de ley sintética *a priori*: «Toda ley pura, que incluye conceptos materiales en modo tal, que no admita una formalización de

---

<sup>2</sup>«Un verdadero desarrollo de la teoría pura, a que nos referimos, debería definir todos los conceptos con exactitud matemática y deducir los teoremas mediante argumenta in forma, es decir, matemáticamente.» (§ 24, Husserl 2006a, pág. 430)

esos conceptos *salva veritate* (o en otras palabras: toda ley que no sea una necesidad analítica), es una ley sintética *a priori*.»

Las leyes sintéticas *a priori* por tanto serán puras (que no proceden de la experiencia) y a su vez se basan en la esencia misma de los objetos.<sup>3</sup>

Se puede observar que la independencia y la no-independencia pueden relativizarse. (§ 13, Husserl 2006a, págs. 408-410) Esta relativización puede establecerse de dos maneras. Se puede tener, por ejemplo, que una determinada parte  $P$  no puede existir si no es en un todo llamado  $T$ . Entonces podrá decir que  $P$  es relativamente no-independiente al todo  $T$ . A esto se le puede llamar «no-independencia relativa de las partes respecto del todo». Por otra parte se puede tener que cierto objeto  $A$  no pueda existir sino junto a otro objeto  $B$ , o sea, enlazado con él. Esto puede llamarse «no-independencia relativa de las partes entre sí». En ambos casos esto sucederá según una ley pura del género al que pertenezcan dichos objetos. Si la ley establece lo contrario, es decir, que  $P$  puede existir fuera de  $T$ , o que  $A$  y  $B$  no tienen por qué existir juntos, ambos serán casos de «independencia relativa». A propósito de estas relaciones, Husserl enuncia una ley (§ 13, Husserl 2006a, pág. 410):

**Ley:** Lo que sea independiente o no-independiente con relación a un  $b$ , permanece también en esa misma propiedad con relación a cualquier todo  $b$ , con relación al cual  $b$  sea independiente o no-independiente.<sup>4</sup>

#### 4.1.2. La fundamentación: sus teoremas y sus tipos

Las anteriores observaciones y definiciones preliminares han servido de acercamiento para una presentación precisa del concepto de fundamentación, que Husserl ofrece así:

Cuando, por ley de esencia, un  $a$  sólo puede existir, como tal  $a$ , si se halla en una unidad comprensiva, que lo enlaza con un  $m$ , decimos que el  $a$ , *como tal*, necesita ser fundado por un  $m$ , o también que el  $a$ , como tal, necesita ser complementado por un  $m$ . Por consiguiente, si  $a_o$ ,  $m_o$  son determinados *casos singulares* (realizados en un todo) de los géneros puros  $a$  y  $m$ , que se hallan entre sí en la relación indicada, decimos que  $a_o$  está fundado por  $m_o$  y *exclusivamente por  $m_o$*  cuando sólo  $m_o$  satisface la necesidad de complementación que siente  $a_o$ . (§ 14, Husserl 2006a, pág. 411)<sup>5</sup>

<sup>3</sup>Esta visión de lo sintético *a priori* suscita la siguiente cuestión: ¿cómo es posible que la ontología formal posea leyes sintéticas *a priori*, si como se acaba de ver, éstas contienen conceptos materiales, y éstos son precisamente los que una disciplina formal no debe contener?

<sup>4</sup>La numeración y nomenclatura de leyes, definiciones, principios, etc. no es introducida por Husserl, pero ayudará en el análisis de las sucesivas ideas y teoremas que propone.

<sup>5</sup>A renglón seguido añade: «Naturalmente podemos trasladar esta terminología a las especies mismas. El equívoco es aquí completamente inocuo.» Sin embargo, como se verá en el capítulo dedicado a la fundamentación, algunos autores no consideran este equívoco tan inocuo, teniendo que añadir, debido a él, ciertos principios al sistema.

De forma sintética, cabría ser expresado así:

**Definición de fundamentación 1:** La especie  $A$  fundamenta a la especie  $B$  si y sólo si existe una ley de esencia que dice que, siendo  $b$  un individuo perteneciente a  $B$  y  $a$  un individuo que pertenece a  $A$ ,  $b$  para existir necesita de la existencia de  $a$ .

A continuación Husserl propone la formulación de seis teoremas que considera que expresan propiedades y relaciones interesantes del concepto de fundamentación, y por lo tanto pueden servir a ese propósito de dotar a la teoría de los todos y las partes de una formulación matemática: (§ 14, Husserl 2006a, págs. 412-413)

**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.»

**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.» (Es considerado un corolario del teorema anterior.)

**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  $T'$ . O de forma breve: La parte independiente de una parte independiente, es parte independiente del todo.»

**Teorema 4:** «Si  $p$  es parte no-independiente del todo  $T$ , será también parte no-independiente de cualquier otro todo, del cual  $T$  sea parte. O bien: Una parte no-independiente de una parte no-independiente es parte no-independiente del todo.»

**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.»

**Teorema 6:** «Si  $a$  y  $b$  son partes independientes de un todo  $T$ , serán también independientes relativamente una de otra.»<sup>6</sup>

Hasta ahora parece que se ha considerado principalmente un caso: aquél en el que una especie fundamenta a otra. Sin embargo, existe también otra posibilidad, en la que ambas especies se fundamenten entre sí, es decir, que no pueda darse la una sin la otra y viceversa. El primer caso se denomina «fundamentación unilateral» y en ella, una especie (la que fundamenta) puede ser independiente. El segundo caso se llama «fundamentación bilateral» y en ella, ambas especies son relativamente dependientes. (§ 15, Husserl 2006a, pág. 414)

---

<sup>6</sup>En el capítulo 5 se ofrece una de las posibles formalizaciones de estos teoremas, tras la discusión acerca de las posibles formulaciones simbólicas del propio concepto de fundamentación.

Además, según el enlace entre las partes sea mediato o inmediato, la fundamentación también podrá ser mediata o inmediata. Se dice que un enlace es inmediato cuando no existen más enlaces entre medias de los dos miembros, y mediato, cuando hay al menos un enlace más entre ambos. Por ejemplo, en el complejo  $a-b-c$ , el enlace entre  $a-b$  y  $b-c$  es inmediato, y el que hay entre  $a-c$  es mediato. Por tanto, se podría decir que los enlaces mediatos se componen de un encadenamiento de inmediatos.

### 4.1.3. Tipos de partes y todos

Según la independencia o no-independencia, se pueden definir dos tipos de partes: pedazos y momentos. (§ 17, Husserl 2006a, pág. 415)

**Definición de pedazo:** «Llamamos pedazo a toda parte que es independiente relativamente a un todo  $T$ .»

**Definición de pedazo disyunto:** «A los pedazos que no tienen en común ningún pedazo idéntico, damos el nombre de pedazos que se excluyen (pedazos disyuntos).»

**Definición de momento:** «Llamamos momento (parte abstracta) del mismo todo  $T$  a toda parte que es no-independiente relativamente a dicho todo.»

Haciendo uso de la noción de pedazo, se puede definir el «todo extensivo»: (§ 17, Husserl 2006a, pág. 416)

**Definición de todo extensivo:** «Cuando un todo admite un despedazamiento tal que los pedazos, por su esencia misma, sean del mismo género ínfimo que el determinado por el todo indiviso, entonces llamamos a ese todo un todo extensivo, y a sus pedazos partes extensivas.»

Husserl aplica el teorema 5 sobre la reciente definición de momento (que es equivalente a la de parte no-independiente) y obtiene lo siguiente: «Puesto que una parte abstracta es también abstracta en relación con cualquier todo más amplio y, en general, con cualquier conjunto de objetos, que comprenda ese todo, resulta que un abstracto en consideración relativa es *eo ipso* abstracto en consideración absoluta.» (§ 17, Husserl 2006a, pág. 415)

A todos los efectos, es irrelevante que el todo del que sean partes los objetos de los que se hable sea independiente o no-independiente, por lo que es posible que un todo independiente tenga partes no-independientes y viceversa, o lo que es lo mismo, que un pedazo tenga momentos y un momento tenga pedazos.

Al igual que la fundamentación, se pueden aplicar las ideas de mediatez e inmediatez a las partes. Así, se obtienen las nociones de partes próximas y remotas. Si  $a$  es parte de  $b$  y  $b$  es parte de  $c$ , entonces tanto  $a$  y  $b$  como  $b$  y  $c$  son partes inmediatas, y  $a$  es parte mediata de  $c$ .

A su vez, si se consideran estas nociones de mediatez no aisladamente, sino respecto del todo, se puede estudiar la diferencia entre partes remotas y próximas de un todo. Se sabe

que las partes de las partes son partes del todo, pero imagínese la situación del párrafo anterior, sabiendo que todas esas partes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  pertenecen a un todo  $T$ . Se podría decir que  $a$  es más remota que  $c$ , puesto que tiene más partes entre ella y  $T$ . Esto si no se consideran más partes, claro está. Si en  $T$  pudiéramos seguir haciendo divisiones, puede que llegáramos a un punto en el que  $c$  sea tan remota como lo era antes  $a$ . De hecho, en el caso extremo de un todo extensivo, toda parte inmediata puede considerarse como mediatas (por ejemplo, al dividir un segmento siempre obtenemos más segmentos). «Esto no quiere decir que los términos de partes mediatas e inmediatas sean completamente caprichosos y faltos de todo fundamento objetivo» (§ 19, Husserl 2006a, pág. 417), pero desde luego han de ser relativizados.

Por último, y ya haciendo uso de todos los conceptos que se han trabajado hasta ahora (fundamentación, mediatez, etc.) se presentan algunas definiciones alternativas, así como otras nuevas: (§ 21, Husserl 2006a, págs. 421-422)

**Definición de fundamentación 2:** «Un contenido de la especie  $a$  está fundado en un contenido de la especie  $b$ , cuando un  $a$  no puede existir conformemente a su esencia (esto es, legalmente, sobre la base de su índole específica), sin que también exista un  $b$ . En todo lo cual queda sin resolver si se exige o no la coexistencia de ciertos  $c, d$ .»

**Definición de todo:** «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.» Esto puede suceder de tres maneras:

- «de manera que todos estos contenidos estén fundados unos en otros inmediata o mediatamente, sin socorro exterior»
- «o también de manera que inversamente, todos juntos funden un nuevo contenido, asimismo sin socorro exterior»
- «también son posibles casos intermedios, donde la unidad de la fundamentación, por ejemplo, se lleve a cabo de manera que  $a$  funda con  $b$  un nuevo contenido y luego  $b$  con  $c$ , y  $c$  con  $d$ , y así sucesivamente en encadenamiento.»

En el primer caso, que podría llamarse **Definición de todo a**, la unidad del todo proviene de la red de fundamentaciones en la que se hallan inmersas las partes, y dicha red queda cerrada en sí misma, sin depender de nada externo. Un encadenamiento de fundamentaciones del estilo de  $a-b-c$  sería un ejemplo sencillo. En el segundo caso, **Definición de todo b**, la unidad del todo proviene de su dependencia respecto de las partes:  $a, b, c$  (y sólo ellos) fundan un nuevo objeto, sin necesidad de dependencia entre ellos. El tercer caso, **Definición de todo c**, es un caso mixto. Husserl pone un ejemplo en el que el nuevo contenido que aparece está fundado por pares de partes.

Cabe entonces puntualizar que «no a todos los todos pertenece necesariamente una forma propia, en el sentido de un momento particular de unidad, que enlace todas las partes». (§ 22, Husserl 2006a, pág. 422) Se añade más adelante:

*Lo que verdaderamente unifica –diríamos sin vacilar– son las relaciones de fundamentación.*

- Por consiguiente, la unidad de los objetos independientes se produce sólo por fundamentación. Siendo independientes, estos objetos no están fundados unos en otros; no queda, pues, sino que ellos mismos, reunidos, funden nuevos contenidos, los cuales, por este estado de cosas, se llamarán contenidos unificativos, con relación a los “miembros” fundamentantes.
- Pero los contenidos que están fundados unos en otros (ya bilateral, ya unilateralmente) tienen, sin embargo, también unidad; y aún más íntima incomparablemente, puesto que no está mediatizada. La “intimidad” consiste justamente en que su unidad no viene traída por un contenido nuevo, que por su parte “produce” la unidad sólo porque está fundado en los muchos miembros juntos, pero en sí mismos separados. (§ 22, Husserl 2006a, pág. 424)

Se recalca aquí de manera clara las dos formas en que la fundamentación produce la unidad de los todos. En el primer caso, que parece coincidir con la **Definición de todo b**, los objetos son independientes entre sí, y precisamente la unidad proviene del nuevo contenido que fundan por estar juntos. El segundo caso, que coincide con la **Definición de todo a**, es considerado como una unidad más íntima porque ésta no viene «de fuera», sino que es producida por todas las relaciones de fundamentación que se dan entre las partes que, en este caso, no son independientes.

Lo que hay de real («perceptible en una sensibilidad») en el todo son los pedazos y las formas sensibles de unidad que se fundan en ellos, y lo que une estos momentos de unidad con los pedazos son las relaciones de fundamentación. (§ 22, Husserl 2006a, pág. 425) De esta forma, al concebir el momento de unidad como algo real, se evitan paradojas como la siguiente, que surge al considerar la unidad como un predicado ideal: si  $a, b$  fundan un momento de unidad  $U$ , entonces  $a, U$ , fundarán un nuevo momento  $U_1$ , etc. puesto que la unidad no es sino una idea que se predica de conjuntos cualesquiera. Sin embargo, esto no es posible en la concepción husserliana porque no se da la relación objetiva de fundamentación entre  $a, U$  que justifique la unidad  $U_1$ . Y es que no debe confundirse un todo con un mero conjunto de objetos, puesto que «conjunto» sólo posee cierta unidad de mención en el pensamiento (§ 23, Husserl 2006a, pág. 426) y no está basado en relaciones de fundamentación. La definición precisa de momento de unidad es la siguiente:

**Definición de momento de unidad:** «Por momento de unidad entendemos un contenido que está fundado por una pluralidad de contenidos; y no por algunos de ellos, sino por todos juntos.» (§ 22, Husserl 2006a, pág. 425)

En ocasiones, cuando ciertas partes fundan un nuevo objeto, y este nuevo objeto, solo o junto con otros, funda otro nuevo, etc. se da un fenómeno que cabría denominar como «niveles»<sup>7</sup>. Husserl pone el ejemplo del dibujo de una estrella, que está formado por estrellas más pequeñas, éstas a su vez por segmentos y los segmentos por puntos. Cada uno de los niveles está fundado en el anterior dando lugar a una gradación de fundamentaciones. A propósito de esta idea, se propone el siguiente principio general: (§ 24, Husserl 2006a, pág. 429)

**Principio 1:** «Partes mediatas o remotas del todo de que son pedazos, serán esencialmente aquellos pedazos que con otros pedazos estén unidos en todos, merced a formas enlazadoras, constituyendo estos todos a su vez unos todos de orden superior, gracias a formas nuevas.»

Completando las ideas sobre partes remotas, se proponen tres principios más: (Íb.)

**Principio 2:** «Partes abstractas de partes abstractas son más remotas respecto del todo que estas partes mismas.»

**Principio 3:** «Las partes abstractas son más remotas respecto del todo, son partes esencialmente mediatas, cuando su necesidad de complemento queda satisfecha en la esfera de una mera parte.»

**Principio 4:** «Las partes abstractas del todo, que no sean partes abstractas de sus pedazos, son más próximas al todo que las partes abstractas de los pedazos.»

## 4.2. Lesniewski

A principios del siglo XX, Stanislaw Lesniewski sacó a relucir de nuevo<sup>8</sup> los conceptos de todo y parte con miras a la fundamentación de las matemáticas. El intento de reducción de las matemáticas a principios lógicos se había visto trastocado debido al descubrimiento de lo que se ha denominado «paradoja de Russell» o «paradoja de las clases autocontenidas», la cual mostraba algunas debilidades de la teoría de conjuntos desarrollada hasta el momento. Es en este contexto en el que Lesniewski presenta sus sistemas como una solución alternativa a dichos problemas.

### 4.2.1. Primeras intuiciones

Para comenzar a comprender la posición de Lesniewski respecto de este problema, conviene analizar el artículo *¿Está la clase de las clases no subordinadas a sí mismas*

<sup>7</sup>Esta idea será tratada en mayor profundidad en el capítulo 6, dedicado a la ontología de niveles.

<sup>8</sup>No reside tanto la novedad en la utilización de los conceptos de parte y todo (pues ya se pueden ver en escritos anteriores de autores como Cantor y Bolzano) como en el tratamiento lógico-formal que se les otorga.

*subordinada a sí misma?* (Lesniewski 1992, págs. 115-128). Este escrito supone una bisagra entre los primeros trabajos de Lesniewski, dedicados más bien a temas lingüísticos, y sus investigaciones sobre los sistemas lógicos, pues en él ya se pueden observar las primeras intuiciones sobre la Mereología. En este escrito se utiliza la siguiente estrategia para lidiar con la paradoja de Russell (Lesniewski 1992, pág. 115): si no existe un objeto que sea la clase de las clases no subordinadas a sí mismas, entonces ambas opciones, tanto

- «la clase de las clases no subordinadas a sí mismas está subordinada a sí misma», como
- «la clase de las clases no subordinadas a sí mismas no está subordinada a sí misma»

son falsas, pues su sujeto no denota nada<sup>9</sup>. Por lo tanto, hay que comenzar preguntándose si existe tal objeto.

A su vez, la existencia de un objeto que sea la clase de las clases no subordinadas a sí mismas, depende de si existe alguna clase no que esté subordinada a sí misma. Si este objeto no se da, el otro tampoco se dará, y las dos proposiciones serán falsas. Se ha de comenzar definiendo lo que significa «estar subordinado a», que para Lesniewski quiere decir lo siguiente:

Un objeto  $P$  está subordinado a una clase  $K$  para algún significado de  $a$  syss:

- $K$  es la clase los objetos  $a$
- $P$  es  $a$

Por ejemplo, si  $a$  quiere decir «ser humano», un objeto  $P$ , si es un ser humano, está subordinado a la clase  $K$  de los seres humanos. Por otra parte, «no estar subordinado a» significa que, dada cualquier interpretación de  $a$ , no se cumplen las dos condiciones anteriores.

Dos consecuencias importantes de esta definición de subordinación, que constituyen la base de lo que se conocerá más adelante como «clases colectivas», son las siguientes:

- Todo  $a$  está subordinado a la clase de los  $a$
- No todo objeto subordinado a la clase de los  $a$  es un  $a$

Siguiendo con el ejemplo anterior, todos los seres humanos están subordinados a la clase de los seres humanos, pero no todas las partes de los seres humanos (piernas, cabezas, etc.), que también quedan subordinadas a dicha clase en este sentido<sup>10</sup>, son seres humanos. De esta forma, la definición de «clase subordinada a sí misma», se establece así:

$K$  está subordinada a sí misma, dado algún significado de  $a$ , syss

<sup>9</sup>Según Lesniewski, los enunciados cuyo sujeto carece de denotación, son falsos (Lesniewski 1992, pág. 127; Urbaniak 2013, págs. 19-20).

<sup>10</sup>Realmente esta parece una asunción no formulada en la definición, pero que se utiliza constantemente en todas las demostraciones del artículo. Por ejemplo, se dice que si todo elemento subordinado a la clase de los cuadrantes de una esfera  $Q$  fuera un cuadrante de dicha esfera, y toda mitad  $P$  de la esfera estuviera

- $K$  es la clase de los  $a$
- $K$  es  $a$

Por tanto, una clase no subordinada a sí misma será aquella que es la clase de los  $a$ , y que, a su vez, no sea  $a$ . Sin embargo, Lesniewski niega que exista tal clase, y da una demostración de ello (Lesniewski 1992, págs. 124-5)<sup>11</sup>:

1. Se asume que alguna clase  $K$  no está subordinada a sí misma, es decir, que no hay ningún significado de  $a$  para el que
  - a)  $K$  sea la clase de los  $a$
  - b)  $K$  es  $a$
2. « $K$  es la clase de los objetos  $n$ » se representará como  $Kn$
3. Por la ley de tautología<sup>12</sup>:  $Kn = Kn + Kn$
4. En otra parte del artículo (punto 3 de la sección 4) se había asumido que la clase de la clase de un objeto o grupo de objetos es lo mismo que la clase de ese objeto, es decir:  $KKn = Kn$
5. Por sustitución de 4 en 3 se tiene:  $Kn = KKn + Kn$
6. Se sabe que la suma de dos clases da lugar a la clase de la disyunción de los objetos que pertenecen a esas dos clases, es decir:  $Ka + Kb = K(a \vee b)$
7. Entonces es cierto que  $KKn + Kn = K(n \vee n)$
8. Por transitividad de la igualdad en 5 y 7 se tiene:  $Kn = K(Kn \vee n)$
9. Como la clase  $K$  es  $Kn$ , entonces
  - a)  $K$  es  $K(Kn \vee n)$
  - b)  $K$  es  $Kn \vee n$  (dice, por las leyes de simplificación y silogismo)
10. Si se nombra « $Kn \vee n$ » como  $a$ , por 9 se tiene:
  - a)  $K$  es  $Ka$
  - b)  $K$  es  $a$

---

subordinada a la clase de los cuadrantes, resultaría que una mitad de la esfera también sería un cuadrante, lo cual es absurdo (Lesniewski 1992, pág. 123). Que esto sea absurdo sólo tiene sentido si se piensa en la esfera como un todo, el cual se ha dividido, desde cierto punto de vista, en sus cuadrantes. Así, se dice que la esfera es la clase colectiva de sus cuadrantes, y por tanto los cuadrantes están subordinados a ella (pues son sus partes). Pero las mitades de la esfera también son partes de ella, y por tanto están subordinadas a ella y, sin embargo, no son cuadrantes.

<sup>11</sup>La notación empleada se ha variado respecto de la original.

<sup>12</sup>Lesniewski cita a Couturat, *L'algèbre de la logique*, 1905, pág. 13.

De esta forma se satisfacen las dos condiciones de subordinación:  $K$  es la clase de los  $a$  y  $K$  es  $a$ , de forma que se puede decir que  $K$  está subordinada a sí misma, contradiciendo la suposición hecha en 1. Y, como se ha mostrado que la proposición «Alguna clase no está subordinada a sí misma» es falsa, se ha mostrado que es verdadera su contradictoria, a saber, la universal afirmativa: «Todas las clases están subordinadas a sí mismas». Y más allá, como todas las clases están subordinadas a sí mismas, es falso que exista alguna clase que no esté subordinada a sí misma, y por tanto tampoco existirá la clase de las clases que no están subordinadas a sí mismas, y por tanto, en la disyunción inicial que presenta la paradoja de Russell, ambas opciones son falsas (porque sus sujetos no denotan nada).

La estrategia de solución de la paradoja consiste, pues, en la reformulación de sus términos: se ofrece una idea de clase y un concepto de subordinación que simplemente no permiten la formulación de dicha paradoja. Dejando a un lado los aspectos dudosos de la solución debido a su informalidad, se puede observar ya en este artículo los rasgos fundamentales de la teoría de clases de Lesniewski, más tarde conocida como Mereología:

- Las clases son sus partes (y no una entidad distinta de ellas que las contenga), y por ello la clase de la clase de un objeto es esa misma clase
- No todos los elementos subordinados a la clase de los  $a$  son un  $a$

#### 4.2.2. La axiomatización de la Mereología

Más adelante, ya no se apoyará en el argumento de que las proposiciones, para ser verdaderas, han de tener un sujeto que denote algo, sino que expondrá estos principios de una manera más sólida. Éstos aparecen ya claramente expuestos en *Fundamentos de la teoría general de los conjuntos. I* (Lesniewski 1992, págs. 129-173) en una forma axiomática. La teoría consta de cuatro axiomas, dos de los cuales hacen uso de sendos términos definidos. Estos principios podrían transcribirse así<sup>13</sup>(Lesniewski 1992, págs. 131-136):

**Axioma I:** Si el objeto  $P$  es una parte del objeto  $Q$ , entonces el objeto  $Q$  no es parte del objeto  $P$

**Axioma II:** Si el objeto  $P$  es una parte del objeto  $Q$ , y el objeto  $Q$  es parte del objeto  $R$ , entonces el objeto  $P$  es parte del objeto  $R$

**Definición I:** Uso la expresión «ingrediente del objeto  $P$ » para denotar el mismo objeto  $P$  y toda parte de ese objeto

**Definición II:** Uso la expresión «conjunto de objetos  $m$ » para denotar todo objeto  $P$  que satisfaga la siguiente condición: si  $I$  es un ingrediente del objeto  $P$ , entonces algún ingrediente de  $I$  es ingrediente de algún  $m$ , el cual es un ingrediente del objeto  $P$

---

<sup>13</sup>Se ha cambiado el nombre de las variables para facilitar la lectura. En esta época, Lesniewski aún no hacía uso de un lenguaje formalizado.

**Definición III:** Uso las expresiones «conjunto de todos los objetos  $m$ » y «clase de objetos  $m$ » para denotar todo objeto  $P$  que satisfaga las dos condiciones siguientes:

- Todo  $m$  es un ingrediente del objeto  $P$ ,
- Si  $I$  es un ingrediente del objeto  $P$ , entonces algún ingrediente del objeto  $I$  es un ingrediente de algún  $m$

**Axioma III:** Si algún objeto es  $m$ , entonces algún objeto es la clase de los objetos  $m$

**Axioma IV:** Si  $P$  es la clase de los objetos  $m$ , y  $Q$  es la clase de los objetos  $m$ , entonces  $P$  es  $Q$

El Axioma I indica que el predicado «ser parte de» no es simétrico. El Axioma II quiere decir que dicho predicado es transitivo. La Definición I se refiere a lo que hoy en día se denomina «parte impropia», es decir, un objeto que o bien es parte de otro, o bien coincide con él. El concepto de conjunto, que aparece en la Definición II, se refiere a algún grupo cualquiera de objetos que sean ingredientes de otro objeto. Lesniewski pone el ejemplo de un país, que es un conjunto de gente, pues algún ingrediente del país es ingrediente de alguna persona, que es ingrediente del país. También podría pensarse, por ejemplo, en las bolas pares del billar: éstas son un conjunto de las bolas del billar, pues dado algún ingrediente de las bolas pares, una bola par, entonces algún ingrediente de la bola par es ingrediente de las bolas de billar. De hecho, el grupo formado por todas las bolas de billar sería un conjunto de las bolas de billar, pero para este «conjunto máximo» se tiene reservado, por la Definición III, el nombre de «clase», que no es sino la definición de «conjunto» con la siguiente cláusula añadida: «todo  $m$  es ingrediente del objeto  $P$ ». Es decir, que una clase engloba necesariamente todos los objetos designados por un nombre. Los axiomas III y IV podrían leerse conjuntamente de la siguiente forma: por cada objeto hay una clase, y sólo una.

Más que las demostraciones, en esta sección interesa comprender el sentido intuitivo de la teoría de Lesniewski, de modo que a continuación se enumerarán algunos de los teoremas y definiciones sobre estas nociones, seguidos de una breve explicación, con el fin de poner de manifiesto algunas de las propiedades interesantes de las partes, los ingredientes y las clases. Estos teoremas pertenecen tanto a «Fundamentos de la teoría general de conjuntos. I» (del Teorema I al XLVIII) como a los capítulos IV<sup>14</sup>-IX de «Sobre los fundamentos de las matemáticas» (teoremas II al CCLXIV). Se ha mantenido la numeración original, pero se ha alterado el orden para tratar de agrupar las ideas por unidad temática.

<sup>14</sup>El capítulo IV es una recapitulación de la axiomatización de 1915, y por tanto una repetición de lo expuesto en *Fundamentos de la teoría de conjuntos. I* con algunas variaciones. Se han fusionado ambos escritos porque, debido su distinto enfoque, se complementan. Además, la cantidad de teoremas probados en 1915 es mucho menos extensa. Las numeraciones no coinciden (es decir, el teorema I de un escrito no dice lo mismo que el teorema I del otro), pero esto no afecta a los propósitos de esta sección. Por esta razón, las definiciones VIII y IX de «Sobre los fundamentos de las matemáticas», se han renombrado como VIII-b y IX-b. Para todo lo demás, se sigue la numeración original de los intervalos de teoremas indicados.

Otras definiciones:

**Definición IV:** X es elemento de Y syss o Y es la clase de los Z o X es un Z

**Definición V:** X es un subconjunto de Y syss todo elemento de X es elemento de Y

**Definición VI:** X es un subconjunto propio de Y syss

- X es subconjunto de Y
- X no es Y

**Definición VII:** el «universo» es la clase de todos los objetos

**Definición VIII:** X es un objeto exterior a Y syss ningún ingrediente de Y es ingrediente de X

**Definición IX:** X es complemento del objeto Y con respecto a la clase Z syss

- Y es un subconjunto de Z
- X es la clase de los elementos de Z exteriores a Y

**Definición VIII-b:** P es  $Q+R$  syss

- P es la clase de los objetos Q o R
- Q es exterior a R

**Definición IX-b:** P es la suma de los a's syss

- P es la clase de los a's
- Dados dos a's cualesquiera, o son el mismo o son exteriores entre sí

Sobre «ser parte de»:

**Teorema I:** «ser parte de» es irreflexivo

**Teorema CVIII:** si hay un objeto, y éste no coincide con la clase de todos los objetos, entonces hay algún objeto que es parte de otro

**Teorema CIX:** si hay dos objetos distintos, hay alguno que es parte de otro

**Teorema CCXVII:** dos objetos con las mismas partes son idénticos (Tesis de extensionalidad)

**Teorema CCXLVIII:** P es parte de Q syss cuando, para algún R, Q es  $P+R$  (Tesis de suplementación débil)

**Teorema CCIL:** si P es parte de Q, entonces para algún R, R es un objeto y Q es distinto de R y Q es una colección de objetos P o R

**Teorema CCLIII:** P es parte de Q syss son objetos distintos y hay algún objeto R distinto de Q y Q es una colección de P o R

Sobre «ser ingrediente de»:

**Teorema II:** «ser ingrediente de» es reflexivo

**Teorema III:** si un objeto es parte de otro, entonces también es ingrediente de él

**Teorema IV:** «ser ingrediente» es transitivo

**Teorema LI:** «ser ingrediente» es antisimétrico (De esta forma, «ser ingrediente de» coincide con «ser parte de», la relación que se suele utilizar como primitiva en la mereología contemporánea.)

Sobre «ser elemento de»:

**Teorema XIV:** «ser elemento de» es reflexivo

**Teorema XV:** «ser elemento de» es transitivo

Sobre la diferencia entre los elementos, las partes y los ingredientes:

**Teorema XI:** los ingredientes son elementos

**Teorema XII:** los elementos son ingredientes

**Teorema XIII:** las partes son elementos

**Teorema LXXXIV:** P es elemento de Q syss P es ingrediente de Q. Es decir, que elemento e ingrediente son equivalentes (Lesniewski afirma que la noción de elemento es superflua en Lesniewski 1992, pág. 248)

Sobre «ser clase» y «ser conjunto»:

**Teorema VIII:** todo objeto es la clase de sus ingredientes

**Teorema IX:** todo objeto es la clase de sus partes (en caso de que las tenga)

**Teorema X:** todo objeto es su propia clase. Es decir, si tenemos un objeto P, P es la clase del objeto P

**Teorema XX:** si X es la clase de los conjuntos de objetos Y, entonces X es la clase de los objetos Y

**Teorema XXIV:** todo objeto es la clase de sus elementos

**Teorema XXV:** todo conjunto es su propio elemento

**Teorema XXVI:** no existe la clase de los conjuntos que no son elementos de sí mismos

**Teorema XXVII:** no todos los elementos del conjunto de los X son X (Los dos teoremas anteriores impiden que se formule la paradoja de Russell.)

**Teorema LXII:** si X es la clase de los a's y todos los a's son b's, entonces X es la clase de los b's

**Teorema LXIV:** si P es la clase de los a's, Q es la clase de los b's, R es la clase de los objetos (P o Q), y S es a o b, entonces S es un ingrediente de R

**Teorema LXXII:** si un objeto es la clase de los a's, entonces es la clase de la clase de los a's

**Teorema XCVII:** si un objeto es la clase de la clase de los a's, entonces es la clase de los a's (Junto con el anterior, permite demostrar que la clase de la clase de los a's equivale a la clase de los a's.)

**Teorema XXIX:** si un objeto es una colección de la colección de a's, entonces es una colección de a's

**Teorema LXXIV:** las clases de objetos son objetos

**Teorema LXXX:** si P es una colección de a's, y todos los objetos que sean a's son ingredientes suyos, entonces P es la clase de los a's

**Teorema LXXXII:** P es la clase de los a's syss

- P es una colección de a's
- Todos los a's son ingredientes de P

Es decir, que la clase de los a's es una colección de a's que los abarca todos.

**Teorema LXXXVI:** si Q es la clase de los a's y P es un a, entonces o bien P es el mismo objeto que Q o es parte de Q. Es decir, que los objetos de los que se compone una clase, y que no coinciden con ésta, son sus partes; como la clase no es sino los objetos de que se compone, cuando sólo hay un objeto, éste coincide con la clase. Por esto se da la disyunción en la segunda parte de la implicación: P es lo mismo que Q o es parte de Q

**Teorema CCXXXV:** P es la clase de los a's syss P es exterior a todo objeto exterior a los a's

Sobre «ser subconjunto»:

**Teorema XXVIII:** los ingredientes son subconjuntos

**Teorema XIX:** los subconjuntos son ingredientes

**Teorema XXX:** las partes son subconjuntos propios

**Teorema XXXI:** los subconjuntos propios son partes

**Teorema XXXVI:** el subconjunto de un subconjunto es subconjunto del todo

**Teorema XLI:** todo objeto es la clase de sus subconjuntos

Sobre «universo»:

**Teorema XLIII:** algún objeto es la clase de los objetos no contradictorios

**Teorema XLIV:** la clase de los objetos no contradictorios es el universo

**Teorema XLV:** sólo hay un universo (unicidad del universo)

**Teorema LXXXVII:** el universo no es parte de nada

**Teorema CIII:** todos los objetos son parte del universo

**Teorema CIV:** si  $P$  es la clase de los objetos  $a$ , y  $Q$  es la clase de los objetos no- $a$ , entonces  $P$  es la clase de los objetos o  $Q$  es la clase de los objetos. Es decir, que la disyunción de una clase y su complemento, cuando éste es su negación, da lugar a la clase de todos los objetos (el universo)

**Teorema CXLIII:** ningún objeto es exterior al universo

**Teorema CL:** la clase de los objetos no tiene suma binaria (puesto que no hay ningún objeto exterior a ella)

Sobre «ser exterior a»:

**Teorema XLVI:** «ser exterior a» es simétrico

**Teorema CXV:** un ingrediente de un objeto no es exterior a éste

**Teorema CXIX:** si hay dos objetos no exteriores, entonces

- O son el mismo
- O el primero es parte del segundo
- O el segundo es parte del primero
- O bien se solapan (comparten al menos una parte)

**Teorema CXXIV:** si todos los  $a$ 's son ingredientes de  $P$  y ningún  $a$  es exterior a ningún ingrediente de  $P$ , entonces  $P$  es la clase de los  $a$ 's

**Teorema CXXXII:** dos objetos son exteriores cuando no son idénticos, no son parte el uno del otro y no comparten partes

**Teorema CXXXIV:**  $P$  es la clase de los  $a$ 's syss

- Es un objeto
- Todos los  $a$ 's son ingredientes de  $P$
- Por cada ingrediente de  $P$ , hay un  $a$  que no es exterior a él

**Teorema CXXXVIII:** un objeto exterior a los  $a$ 's es exterior a la clase de los  $a$ 's

Sobre «ser complemento de»:

**Teorema XLVIII:** si  $X$  es parte de  $Y$ , entonces algún objeto es el complemento de  $X$  respecto de  $Y$ . (Es decir, otra forma de expresar la suplementación: un objeto no puede tener sólo una parte propia, necesita un complemento)

**Teorema LI:** «ser complemento de» es simétrico

**Teorema LIV:** unicidad del complemento. Un objeto sólo puede tener un complemento respecto de una clase

**Teorema LV:** «ser complemento de» no es reflexivo

**Teorema CXLV:**  $P$  es el complemento de  $Q$  respecto de  $R$  si y sólo si

- $Q$  es ingrediente de  $R$
- $P$  es la clase de los ingredientes de  $R$  exteriores a  $Q$

Sobre la suma binaria y la suma o fusión :

**Teorema CLIII:** sólo hay un objeto que consista en la suma de  $Q+R$  (unicidad de la suma)

**Teorema CLVIII:** la clase respecto de la que dos objetos son complementos, es la suma de éstos

**Teorema CLX:** si un objeto tiene una parte propia, hay un complemento que completa la suma. (De nuevo, la tesis de suplementación débil)

**Teorema CLXXVII:** cada objeto es su propia fusión. Es decir, si un objeto es  $P$ , será la fusión de  $P$

**Teorema CLXXXI:** si  $P$  es  $Q+R$ , entonces  $P$  es la fusión de  $Q$  o  $R$

**Teorema CXCVIII:** si hay una suma con al menos dos objetos distintos, entonces hay más colecciones de objetos que objetos. (Es el equivalente mereológico al teorema de Cantor. Ver Lesniewski 1992, pág. 314 y Srzednicki, Rickey y Czelakowski 1984, págs. 223-224)

**Teoremas CCXXXIX y CCXL:** si  $P$  es  $Q+R$  entonces

- $R$  no es parte de  $Q$  (CCXXXIX)

- Q no es parte de R (CCXL)

(Otro ejemplo de expresión de la idea de suplemento. En este caso se ve claro que la tesis podría no ser cierta si P o Q son partes abstractas.)

Quizá pueda resultar útil, con fines ilustrativos, imaginar cierto modelo de esta teoría y tratar de describirlo como si de un relato se tratara, a la luz de los teoremas y definiciones expuestos. En este mundo se tienen tres objetos diferentes, exteriores entre sí: A, B y C. De este mundo se podría decir, entre otras cosas, lo siguiente:

Para comenzar, el universo sería la clase de los objetos A, B y C y, también, la fusión de los mismos.

Dado que se admite la fusión de objetos diferentes exteriores cualesquiera, también se tendrían las siguientes fusiones: A-B, A-C y B-C (puesto que C-A sería la misma que A-C, y lo mismo con B-A y C-B, ya que, por CCXVII, dos objetos con las mismas partes son idénticos). A su vez, estas fusiones también serían las sumas binarias A+B, A+C y B+C.

Por el hecho de tener tres objetos distintos se observa que se tienen, entonces, otros cuatro: U (el universo) y F1, F2 y F3 (las tres posibles fusiones y sumas). Además, F1, F2 y F3 serían clases y colecciones.

Además, como se sabe por CVIII y CXIX, por el hecho de tener tres objetos ya se tienen, en un principio, tres relaciones de parte: A, B y C son parte de U. Pero, también, A y B son parte de F1, A y C lo son de F2, y B y C lo son de F3.

Se sabe que A, B y C son exteriores entre sí, pero no así las clases que forman entre ellos: F1 se solapa o comparte partes con F2 y F3, F2 se solapa con F1 y F3, etc.

Se tiene, de esta forma, un solo objeto, el universo, que puede ser examinado según los niveles de composición (tiene partes, y esas partes tienen partes, etc.) pero que no es una entidad, por decirlo así, superior o distinta de sus partes, como si fuera un contenedor abstracto que las alberga, pues no es sino sus partes: U consiste en A, B y C, y si uno «observara» este objeto, no vería sino la reunión de A, B y C (que no necesariamente han de exhibir proximidad espacial). Si, desde otro punto de vista se considerara que U está compuesto de F1, F2 y F3, sucedería lo mismo, pues estas clases no son sino maneras de nombrar por pares a A, B y C. Y de forma similar ocurre, por ejemplo, si se dijera que U consiste en F2 y B: la fusión de F2 (que es la suma de A y C) con B, da lugar a una clase que contiene todos los objetos de ese mundo, es decir, U. Y por esto, una clase que contuviera a U y sólo a U, sería lo mismo que U, y más allá, una clase que sólo contuviera una clase que sólo contuviera a U, sería idéntica con U, etc. No hay nada distinto entre una clase mereológica y sus componentes: no hay un «vacío» entre ellos ni una separación de tipos lógicos.

Se puede observar que esta versión de la mereología es, como se discutirá más adelante, extensional. Esto quiere decir que en ella se considera que toda parte ha de ser parte concreta o extensa. Es por esto por lo que, según dejan ver, por ejemplo, los teoremas XLVIII, CLX, CCXVII, CCXXXIX, CCXL, CCXLVIII, CCIL y CCLIII, un objeto no

puede tener sólo una parte (propia), pues de esta forma quedaría un «hueco» en dicho objeto, que necesitaría ser completado por otra parte propia. Abundan en los escritos de Lesniewski los ejemplos geométricos (segmentos, esferas), así como los referentes a cuerpos físicos (países, ciudades, personas), los cuales tienen una característica en común: poseen algún tipo de extensión espacial. No se ha de olvidar que la meta principal que Lesniewski tenía en mente al construir su teoría era ofrecer una fundamentación alternativa de las matemáticas, por lo que sus conceptos suelen ser más fácilmente aplicables a objetos sencillos, atemporales y, sobre todo, extensos. Es por esto por lo que pueden aparecer paradojas cuando se trata de aplicar una teoría de estas características a objetos tales como animales (que pueden perder partes sin dejar de ser ellos) o propiedades (pues, desde determinado punto de vista, una propiedad podría considerarse una parte propia que no necesita complemento). Sin embargo, estos problemas se discutirán con detalle más adelante a la luz de algunas observaciones de ontólogos contemporáneos.

### 4.3. Leonard y Goodman

Las dos principales fuentes en las que se puede estudiar el pensamiento acerca de la mereología de estos dos autores son el libro *The structure of appearance* (Goodman 1966) y el artículo *The calculus of individuals and its uses* (Leonard y Goodman 1940).

En el artículo mencionado, se presenta la idea de la utilización de la mereología (aquí denominada cálculo de individuos) como herramienta para dirimir ciertos problemas filosóficos de una manera técnica. Reconocen que el cálculo que proponen ya fue presentado por Lesniewski varios años antes (Goodman 1966, pág. 46) y, de hecho, es sólo una variante que utiliza «discreto» (la negación de «solapado») como primitivo. Sin embargo, las similitudes terminan aquí, pues estos autores no se centran en absoluto en el tema de la fundamentación de las matemáticas.

Al comienzo del artículo se hace hincapié en el hecho de que lo que sea denominado individuo es relativo al discurso (Goodman 1966, pág. 45). Es decir, que según la manera de abordar la realidad que se esté utilizando, se tenderá a denominar individuo a ciertas entidades que, en otros casos, se verán más bien como partes. Por ejemplo, es común que la sociología trate a personas y sociedades como individuos, y vea las células como unos componentes muy básicos de éstos; sin embargo, un microbiólogo verá a las personas como compuestos de muy alto nivel. Como ya se ha visto, y se tratará más en extenso en secciones posteriores, la idea de los niveles de composición supone casi una constante en el pensamiento mereológico, y su desarrollo supondría un buen complemento para la comprensión de la relatividad de los todos y las partes.

Pero quizá una de las propuestas clave del artículo sea la de utilizar el cálculo de individuos para tratar con las relaciones «multigrado» (*multigrade*) (Leonard y Goodman 1940, pág. 50). Supongamos que se tiene la relación «estar con». Se sabe que una persona puede estar con otra, pero, también, con otras. Es decir, que sería habitual afirmar «A

está con B», pero también algo como «A está con B y C». El primer caso se expresaría formalmente, por ejemplo, como « $xRy$ ». Sin embargo, el segundo caso resulta problemático. Al ser R una relación diádica, sólo se puede decir de dos individuos, de tal forma que habría que decir «A está con B y A está con C». Pero no era eso lo que se quería expresar, sino que A está con B y C a la vez. De tal forma que, o bien se introducen complejas expresiones temporales, o bien se trata de introducir un conjunto. Así, A estaría con el conjunto que contiene a B y C. Pero esto también es discutible pues el conjunto y sus elementos pertenecen a tipos distintos y además, en un sentido más intuitivo, sería falso (pues A está con dos personas y no con una entidad abstracta que las engloba). La solución propuesta, entonces, consiste en sacar provecho del hecho de que las clases mereológicas y los individuos que las componen pertenecen al mismo nivel: un bosque no es distinto de los árboles que lo componen, un cuerpo no es distinto de las células que le dan forma, etc. Así, «A está con B y C» se podría expresar como «A está con la suma de B y C», formalizadamente « $xRy+z$ ». Esta idea resultará útil para el desarrollo de la ontología propuesta en *The structure of appearance*, como se verá a continuación.

En dicho libro se repasan las ideas del artículo y se añaden otras muchas, desarrollándolas hasta sus últimas consecuencias con el objetivo de presentar una ontología, una teoría formalizada que permita tratar lógicamente lo real, lo que aparece. Se trata de un trabajo de gran calado, que combina cuestiones profundas en el sentido filosófico, y también en el técnico. Por ejemplo, se pueden encontrar disertaciones bastante detalladas acerca de las condiciones que han de cumplir las definiciones de un sistema (Goodman 1966, págs. 3-32), así como una forma de medir la complejidad de un sistema axiomático, que serviría para decidir la mejor de entre distintas formulaciones (Goodman 1966, págs. 66-123). No obstante, en pos de la pertinencia, se describirán sólo de manera algo detallada las ideas que conciernen de forma más directa a la mereología tal y como se viene presentando (pues, estrictamente hablando, la temática del libro supera ampliamente el alcance de las teorías mereológicas).

El aparato lógico general, como se denomina en el libro, está formado por el cálculo de predicados y el cálculo de individuos (desarrollado en el capítulo segundo). La peculiaridad del cálculo de individuos es que permite prescindir de lo que se denomina clases en sentido «platónico». Para Leonard y Goodman, el enfoque platónico, sin pretender ser históricamente exacto, es el que admite entre sus teorías otras entidades aparte de individuos. El enfoque nominalista, por otro lado, sólo admite individuos. Esto no quiere decir que no admita entidades abstractas, sino que no admite entidades tales como universales o conjuntos distintos de las entidades que contienen. (Goodman 1966, pág. 37) De hecho, el propio sistema propuesto en el libro toma como individuos básicos los *qualia*, que son individuos abstractos.

En definitiva, el propósito central del libro consiste en desarrollar un sistema fenomenista (por oposición al fisicalismo) y realista (puesto que los elementos últimos que acepta son abstractos, ya que son cualidades). Estos elementos últimos, los *qualia*,

se relacionan entre sí a través de la relación de unión (*togetherness*), representada por el predicado *W*. (Goodman 1966, págs. 208-209) Así, los *qualia* se unen para formar complejos (*complexes*), los cuales pueden ser o bien concretos (*concreta*) o bien cualidades (*qualities*). Se hace uso, por tanto, de una mereología atomista, pues se acepta el hecho de que se dan unas entidades que son parte de otras, pero que a su vez ya no tienen partes.

Una de las aplicaciones más inmediatas del cálculo de individuos, además de permitir expresar las relaciones de todo-parte entre los *qualia* y los complejos, es el de facilitar la utilización de la relación multinivel *W*. Según la teoría presentada, un *quale* puede estar junto a otro, pero también puede estar junto a otros dos, tres, etc. Así, de manera similar al ejemplo expuesto más arriba, cuando el *quale* *q* está junto a *p*, *r*, y *s*, se podrá expresar mediante « $qWp+r+s$ », sin necesidad de hacer uso de elementos de un tipo lógico distinto, y por tanto sin necesidad de admitir conjuntos<sup>15</sup>. Todas las entidades que aparecen serían o bien *qualia*, o bien cierta combinación de *qualia*. Por ejemplo, un punto de color sería la combinación de un *quale* de color, uno temporal y uno espacial (puesto que el punto se da con este tono, aquí y ahora). De esta forma, se pretende presentar una teoría que analice todo lo real a través de las relaciones entre sus componentes últimos.

Precisamente en lo referente a las relaciones, la teoría ha de ser ampliada de nuevo. Si a la lógica de predicados y a la mereología se les añadía el predicado *W* en orden a expresar la unión de los elementos últimos, ha de ser necesario también idear otro concepto que permita lidiar con el orden de dichos elementos, pues varios elementos que están juntos, pueden estarlo de diferentes maneras (con distintas estructuras espaciales, distintas sucesiones temporales, etc.). El nuevo primitivo candidato para esta tarea es *M* (*match*) (Goodman 1966, págs. 272, 283), el cual indica que dos *qualia* son indistinguibles tras su examen. A través de esta relación de coincidencia se puede expresar, por ejemplo, que de tres *qualia* coincidentes, uno está entre los otros dos, y así, en primera instancia, expresar órdenes lineales y, más tarde, formas complicadas (bidimensionales, espaciales), fundando lo que se ha denominado «topología de la cualidad». (Goodman 1966, 293 y ss., Cap. X)

Las consideraciones acerca del orden y la topología de la cualidad se extienden de manera profusa pero, para el presente trabajo interesa, sobre todo, el reconocimiento del siguiente hecho: que la mereología, tal y como se la ha venido exponiendo, ha de ser completada si es que se está interesado en expresar, no solo la relación entre los individuos y las clases colectivas, sino el orden, la estructura que esos individuos mantienen entre sí, y que distingue unas clases de otras.

#### 4.4. Casati y Varzi

En su obra *Parts and places*, Casati y Varzi (Casati y Varzi 1999) retoman la idea de que es necesaria una complementación de la mereología si es que se quiere lidiar

<sup>15</sup>Si bien es cierto que los autores no logran desembarazarse por completo de los conjuntos, como ellos mismos reconocen. (Goodman 1966, págs. 45-46) Aunque parecen sostener que se trata más bien de un problema técnico que ha de ser resuelto con el tiempo, y no de una imposibilidad total.

con el orden de los objetos que pueblan el mundo. Junto con estas reflexiones acerca del orden se presenta una exhaustiva caracterización de las diferentes posibilidades de formalización de la mereología, según se añadan unos postulados u otros, debido a la dirección que se pretenda tomar. Conviene comenzar, entonces, con la clasificación de las familias mereológicas, para así poder estudiar sus propiedades de forma sistemática y examinar las razones que proponen los autores para promulgar una complementación de la mereología, en concreto, a través de la topología.

En primer lugar, se ha de tener en cuenta que la búsqueda de estos autores se centra en una suerte de fenomenología formalizada de los objetos cotidianos, o de lo que se denomina en ocasiones «mesomundo», el mundo que aparece entre las escalas de los milímetros y los kilómetros. Además, tiene en cuenta objetos, por así decir, terminados (no en puntos de luz, manchas de color etc., sino más bien en personas, animales, rocas...). Pese a esta asunción inicial, el libro tiende a centrarse más en los aspectos formales-técnicos que en los ontológicos, y de hecho, suele repetir que trata de no teorizar sobre la ontología empleada, y es que los autores tienden a seguir una corriente de pensamiento que tiene a la mereología como una teoría neutra o metafísicamente inocente (que ya se puede observar en algunos seguidores de Lesniewski, como Sobocinski (ver Srzednicki, Rickey y Czelakowski 1984, pág. 218)). Es decir, manejan la mereología como una teoría no interpretada (no al menos totalmente, ya que de entrada sí restringen el universo del discurso), una herramienta aplicable a ciertos problemas filosóficos.

Estos autores presentan la mereología como un orden parcial al que se pueden añadir sucesivos axiomas. Es decir, se tiene un núcleo M, que consiste en tres principios (Casati y Varzi 1999, pág. 33):

- Todo es parte de sí mismo (reflexividad):  $\forall x(P(x, x))$
- Toda parte de cualquier parte de una cosa es ella misma parte de esa cosa (transitividad):  $\forall xyz(P(x, y) \wedge P(y, z) \rightarrow P(x, z))$
- Dos cosas distintas no pueden ser partes la una de la otra (antisimetría):  $\forall xy((P(x, y) \wedge P(y, x)) \rightarrow x = y)$

Como se ha visto, este núcleo está contenido en la versión presentada de la mereología de Lesniewski (el concepto de ingrediente es un orden parcial) así como en la versión de Leonard y Goodman (pues si bien tampoco utilizan «parte» en este sentido como primitivo, sí es fácilmente definible en su sistema). Lesniewski utiliza «parte» como primitivo, pero como se ha visto, consiste en una relación distinta (irreflexiva, asimétrica y transitiva) de la que aquí se denomina «parte». En concreto, corresponde a lo que Casati, Varzi, Leonard y Goodman denominan «parte propia». De aquí en adelante se preferirá este vocabulario, y se traducirán a él las nociones de Lesniewski que se mencionen, en orden a uniformizar el lenguaje y evitar confusiones.

En primera instancia puede parecer que el punto de partida de Lesniewski, utilizando parte propia, resulte más intuitivo, pues resulta extraño de entrada admitir que algo sea

parte de sí mismo. Sin embargo, no hay que olvidar que la reflexividad, por un lado, sólo es un caso límite (Casati y Varzi 1999, pág. 34) en el que los dos argumentos de la función  $P$  denoten el mismo objeto, y por otra, se ha de recordar que se trata simplemente de un artificio lógico que pretende clarificar y restringir lo que en el lenguaje corriente se denomina «parte». Por tanto, es posible que ni la parte impropia ni la propia, ni siquiera ambas nociones juntas, sean capaces de expresar la totalidad de sentidos en los que se emplea, coloquialmente, «ser parte de algo».

La transitividad, postulada ya por Husserl, no parece ofrecer mayor problema: que la parte de una parte es parte del todo es inherente al sentido mereológico de «parte», y es lo que distingue esta teoría de la de conjuntos (entre otras cosas). La antisimetría, por su parte, trata de rechazar casos extraños como los bucles en los que, por transitividad, el último objeto de una serie resulte ser parte a su vez del primero, lo cual resulta absurdo.

Este núcleo teórico  $M$  se puede ampliar de varias maneras. La primera de ellas es a través de lo que los autores denominan principios de suplementación. (Casati y Varzi 1999, 39 y ss) Existen dos tipos de suplementación:

- Suplementación débil (WS: *weak supplementation*): si  $x$  es parte propia de  $y$ , entonces hay otro objeto que es parte de  $y$ , y no se solapa con  $x$ . Este postulado, junto a  $M$ , da lugar a la Mereología Mínima (*Minimal Mereology*), designada por  $MM$ .  $\forall xy(PPxy \rightarrow \exists z(Pzy \wedge \neg Ozx))$
- Suplementación fuerte (SS: *strong supplementation*): si  $y$  no es parte de  $x$ , entonces hay un objeto que es parte de  $y$ , y no se solapa con  $x$ . Es decir, que si un objeto no contiene a otro como parte, entonces ha de haber un resto que forma parte del uno pero no del otro. Este principio implica el anterior, pero no al revés. Tiene la peculiaridad de que falla para objetos distintos formados por las mismas partes. Añadido a  $M$  da  $EM$  (*Extensional Mereology*).  $\forall xy(\neg Pyx \rightarrow \exists z(Pzy \wedge \neg Ozx))$

Es un teorema de  $EM$  que dos objetos con las mismas partes son idénticos. (Casati y Varzi 1999, pág. 40) Cabe señalar que la mereología de Lesniewski es, en este sentido, extensional, pues el teorema CCXVII mencionado anteriormente establece justamente este hecho. A esta variante de la mereología se le suelen presentar dos objeciones, que se examinarán detalladamente más adelante: la primera, que dos objetos pueden tener las mismas partes, pero diferir en la ordenación de éstas; la segunda, que un objeto puede sobrevivir a la aniquilación de ciertas partes (y por tanto, ser el mismo objeto aunque en distintos momentos tenga partes propias diferentes).

Otra de las maneras a través de las cuales se puede ampliar la mereología es a través de principios de cierre o clausura, lo cual consiste básicamente en agregar unos axiomas de suma y producto como los siguientes (Casati y Varzi 1999, 43 y ss):

- Suma: si dos objetos,  $x$  e  $y$ , están subsolapados<sup>16</sup>, entonces hay un tercer objeto que se solapa con todo lo que solapa a  $x$  o todo lo que solapa a  $y$  (ese tercer objeto sería la suma)  $\forall xy(O(x, y) \rightarrow \exists z\forall w(O(w, z) \leftrightarrow (O(w, x) \vee O(w, y))))$
- Producto: si dos objetos,  $x$  e  $y$ , están solapados, entonces hay un tercer objeto que es parte de todo lo que es parte de  $x$  y de todo lo que es parte de  $y$  (ese tercer objeto sería el producto)  $\forall xy(O(x, y) \rightarrow \exists z\forall w(P(w, z) \leftrightarrow (P(w, x) \wedge P(w, y))))$

Si estos axiomas se añaden a M, se tiene CM (*Closure Mereology*). Si se añaden a MM y EM se tiene, respectivamente, CMM y CEM (*Minimal Closure Mereology* y *Extensional Closure Mereology*) que resultan ser la misma teoría (pues en presencia de la suplementación débil, el producto implica la suplementación fuerte).

Una tercera forma de extender la mereología es a través de fusiones irrestrictas, es decir, aceptando la suma de cualquier conjunto arbitrario no vacío. (Casati y Varzi 1999, 45 y ss) Tanto Lesniewski como Leonard y Goodman aceptan este tipo de fusiones. Añadido a M, se tiene GM (*General Mereology*, o también, *Classical Mereology*), y añadido a MM o EM, se tiene la misma teoría, GEM (*General Extensional Mereology*).<sup>17</sup>

Por último, ha de considerarse si la teoría mereológica que se pretende desarrollar es atomista o no. Un átomo sería una entidad que no tiene partes propias. En principio, cualquiera de las variantes de la mereología propuestas hasta ahora puede tener su versión atomista o no atomista, según se acepte o no la existencia de tales entidades.

Teniendo estas clasificaciones presentes, se ha de atender a algunas de las dificultades que surgen, supuestamente, a todas las variantes de la mereología, y que podrían dar fuerza a la idea de que ésta ha de ser complementada. La principal razón que se ofrece es que la mereología únicamente trata de partes, y no de todos. Es decir, que «ser un todo» es una propiedad monádica que no puede ser reducida a estructuras de partes. (Casati y Varzi 1999, págs. 10-11) Por ejemplo, según la mereología, la suma o fusión de los pedazos de una copa rota, equivaldría a esa misma copa íntegra<sup>18</sup>. Sin embargo, desde el punto de vista de la fenomenología de los objetos cotidianos, es evidente que esto no es así.

Otra de las razones, en estrecha conexión con la anterior, es que no resulta posible discriminar los «buenos» de los «malos» todos. (Casati y Varzi 1999, págs. 10-11) Si se aceptan las fusiones irrestrictas, cualquier combinación de partes habría de ser llamada

<sup>16</sup>Dos objetos están subsolapados (*underlap*) cuando ambos son parte de un tercer objeto.

<sup>17</sup>En 1953, Tarski probó que GEM es equivalente a un álgebra de Boole sin elemento nulo (Casati y Varzi 1999, pág. 47 y Hovda 2009, pág. 72), lo cual resulta interesante respecto del proyecto matemático de Lesniewski. Como se ha visto, su teoría cumple los requisitos para ser considerada una GEM, y si ésta es equivalente a un álgebra de Boole sin elemento nulo, no puede ser equivalente a la teoría de conjuntos, ya que la teoría de conjuntos puede ser expresada como un álgebra de Boole completa. Esto podría ser un argumento contra el programa de Lesniewski.

<sup>18</sup>Habría que matizar: la mereología extensional diría que es así. Una no extensional no necesariamente hace idénticos dos todos con las mismas partes: diferirán en algo. Pero de todas formas, a la mereología le faltaría el vocabulario para expresar ese algo, así que el argumento sigue siendo válido para cualquiera de las variantes presentadas.

un «todo», incluso aquéllas intuitivamente absurdas. Uno de los casos particulares de estos «malos todos» que se suele esgrimir en contra de la mereología es el de los «objetos dispersos» (*scattered objects*), que serían las sumas compuestas de elementos totalmente separados, e incluso dispares, como la suma de este bolígrafo y un mosquito que pase volando a mil kilómetros, etc.

La supervivencia a la eliminación de partes supone otro de los retos de la mereología. Es habitual decir que, en cierto sentido, el gato que pierde la cola sigue siendo el mismo gato, aunque no tenga las mismas partes, o que ciertos órganos renuevan todas sus células cada cierto tiempo, y no por ello la persona deja de ser la que era. Por las mismas razones que en los casos anteriores, dado que identidad de partes suele significar identidad de objetos, el gato con cola y el gato sin cola serían objetos diferentes<sup>19</sup>.

La solución que los autores proponen es, a fin de cuentas, suplementar la mereología a través de la noción de conexión, perteneciente a la topología. Sólo de esta forma, dicen, se puede expresar la unidad que existe en los objetos físicos, en los que las partes están conectadas entre sí. (Casati y Varzi 1999, págs. 51-2) Existen básicamente tres formas de llevar a cabo esta suplementación:

- Que mereología y topología sean consideradas teorías independientes, y se trate la mereología como un núcleo sobre el que se añaden más teorías
- Que la topología sea la base de la mereología
- Que la topología sea una mereología restringida a ciertos tipos de entes

La opción preferida por los autores es la primera, la cual ha sido seguida también por Tarski al desarrollar su geometría de los sólidos, y Lejewski con su «cronología». (Casati y Varzi 1999, pág. 53; Lejewski 1981) A estas consideraciones les siguen otras tantas reflexiones y precisiones técnicas acerca de la axiomatización de la topología. Sin embargo, llegados a este punto, resulta clave plantearse si es realmente necesario suplementar la mereología en algún sentido y, en ese caso, si es la topología el mejor suplemento.

Las ideas de Husserl acerca de la fundamentación pueden ayudar a plantear el problema. A través de la noción de fundamentación Husserl pretende distinguir los todos de los meros agregados (Casati y Varzi 1999, pág. 13), es decir, que la fundamentación es la razón que dota de unidad a un todo. Así, se puede decir que la unidad de este todo está fundamentada en la causalidad, o en la estructura funcional, en la teleología, etc., siendo la causal, la funcional, la teleológica, etc., tipos de unidad. Dentro de este esquema, Casati y Varzi optan por estudiar la unidad topológica, que es la que consiste en partes conectadas entre sí. Es evidente, como se ha hecho notar al principio de la sección, que eso obedece a unas razones muy concretas (estudiar la estructura de los –o más bien algunos– objetos físicos

---

<sup>19</sup>En el artículo *Mereology* (Varzi 2014) se ofrece una exposición mucho más completa de esos puzzles mereológicos que la que se da en el libro.

cotidianos) y de ninguna manera puede tomarse como la dirección general a seguir en el estudio de la mereología.

Parece claro que esta unidad por conexión topológica no es en muchos casos la idónea a la hora de tratar con sistemas complejos, pues, ¿no es una población humana, un hormiguero, un ecosistema... precisamente una suma de objetos dispersos, es decir, todos con partes no conectadas entre sí? Será entonces necesario continuar investigado acerca de la noción de fundamentación con el objetivo de ahondar en el concepto de unidad y sus tipos, de forma que se esté en condiciones de juzgar el papel de estos elementos en la descripción de la estructura ontológica de los sistemas complejos. De esta forma, se podrá determinar si es necesaria una suplementación de algún tipo respecto de la mereología, y si ha de ser tan fuerte como la topología, o más bien algo de mayor amplitud y versatilidad.

## 4.5. Conclusiones

Uno de los principales problemas con los que tiene que lidiar la mereología es el de la polisemia del concepto «parte». De forma muy general, se podría afirmar que existen básicamente dos maneras de tratar el concepto de parte: la amplia y la estrecha. Se pueden exponer a través de un ejemplo:

Se tiene, en el momento  $t_1$ , un montón de tablas y clavos apilados. En el momento  $t_2$ , a través de ciertos movimientos, esos materiales se han transformado en una casa. La suma total de materiales es la misma, pero no la forma en que están dispuestos. Según la noción de parte que estemos empleando, la respuesta a la siguiente pregunta será diferente: ¿son idénticos los todos existentes en  $t_1$  y  $t_2$ ?

Si la respuesta es sí, se podría decir que se maneja la noción estrecha de parte, comúnmente conocida como «extensional» (por analogía con la extensionalidad en teoría de conjuntos). Esta noción trata de captar el comportamiento de partes extensas, medibles, pedazos, concretas. Por ejemplo, segmentos de una figura, sílabas de una palabra, partículas materiales, tablones de un mueble, ladrillos de un muro, etc.

Si la respuesta es no, se está manejando la noción amplia, que no sólo engloba partes concretas, sino también lo que Husserl denominará partes abstractas o dependientes. En el ejemplo anterior, intuitivamente se podría responder que los todos en  $t_1$  y  $t_2$  no son idénticos porque el segundo tiene una parte que el primero no posee: la organización. Si se quiere afinar más: la organización difiere (ambos la tienen, pero sólo en el segundo caso le otorga la estructura de casa). La organización no es una parte como los clavos o las tablas, puesto que no puede existir separadamente de éstos (siempre es una organización-de-algo), pero tampoco se puede reducir a los clavos y las tablas, puesto que entonces, habría que afirmar que los todos de  $t_1$  y de  $t_2$  son idénticos. La amplia noción de organización podría analizarse, en este caso, por ejemplo, en la noción de relaciones espaciales (los tablones se cruzan en varias posiciones que pueden ser descritas por coordenadas, los clavos atraviesan los tablones perpendicularmente, etc.). Otras nociones, tales como el color, la temperatura,

etc. también pueden verse como partes abstractas. Se observará cómo este problema se encuentra en estrecha relación con la clásica afirmación de que «el todo es mayor que la suma de las partes».

Siguiendo este esquema general, se está en condiciones de afirmar que la familia de mereologías que preeminentemente interesará al estudio de los sistemas complejos será la que contiene aquellas teorías que hagan uso de la noción amplia de parte, las no extensionales. Esto es así ya que, como se ha visto, los conceptos de «relación», «organización» y otros por el estilo, así como muchos conceptos científicos tales como energía, resultan esenciales para el examen de los sistemas complejos, a la vez que no pueden ser asimilados por una mereología puramente extensional.

Otra de las dificultades que surgen en el estudio de la mereología es el de la formalización. Como se ha visto, a partir de Lesniewski (aunque ya existan en Husserl varias propuestas al respecto) se trata de dar a esta teoría una forma axiomática, ya sea en lenguaje natural o en algún simbolismo que elimine ambigüedades. El tratar de encontrar un conjunto de axiomas lo suficientemente potente como para expresar las propiedades del concepto de parte (y decidir cuáles sean esas propiedades) constituye una difícil tarea, ante la cual se abren una infinidad de caminos que van a parar a propuestas teóricas de lo más dispares.

## Capítulo 5

# El concepto de fundamentación

Como se indica al final del capítulo anterior las mereologías que se muestran más aptas a la hora de lidiar con los sistemas complejos serán aquéllas no extensionales, es decir, las que permitan distinguir partes abstractas, como la estructura, en las entidades. Se ha visto, a su vez, que Husserl define las partes abstractas de un todo como aquéllas que son dependientes, o dicho de otra manera, como aquéllas que están fundamentadas en otras. En este capítulo se contemplará de forma detallada el concepto de fundamentación, con el objetivo de esclarecerlo y refinarlo para su posterior uso en una mereología no extensional que permita definir ontológicamente los sistemas complejos.

El propio Husserl reconoce que la simbolización de sus reflexiones mereológicas es necesaria (§ 24, Husserl 2006a, pág. 430 y Fine 1995, pág. 464) en orden a demostrar con rigor matemático los fundamentos de los teoremas expuestos. Sin embargo, al embarcarse en la tarea de asignar a cada concepto un significado preciso, comienzan a surgir ciertos problemas de interpretación. Algunos de ellos poseen un carácter más bien lingüístico; sin embargo, otros están dotados de una carga filosófica de mayor profundidad.

De entre los problemas que podemos encontrar en las reflexiones *husserlianas* sobre los todos y las partes, se podría considerar que los más importantes son –pues de las distintas direcciones de resolución depende por entero la interpretación final– las relaciones entre las especies y los objetos y los distintos sentidos del término «fundamentación». A continuación, se ofrecerá una reflexión sobre ellos, de la mano de algunos de los trabajos de referencia sobre el tema.

En lo que sigue, de manera provisional, hasta que más adelante se le dote de una significación más precisa, se tomará el término «especie» como refiriéndose a un nombre común, el nombre de un grupo de individuos que, por ejemplo, comparten ciertas características comunes. Se utilizarán letras mayúsculas para las especies, y minúsculas para los individuos. La expresión «un *A*» quiere decir «un individuo de la especie *A*».

### 5.1. Especies, objetos y fundamentación

La fundamentación es el concepto mereológico más básico en Husserl, y en el uso que este autor hace de él, se podrían distinguir, en cuanto a la referencia a individuos y especies, al menos dos sentidos (Simons 1982, pág. 122)<sup>1</sup>:

- Fundamentación genérica: es la que relaciona especies. Se utiliza cuando se afirma «la especie  $A$  está fundada en la especie  $B$ »
- Fundamentación individual: relaciona individuos que pertenecen a especies relacionadas fundacionalmente. Por ejemplo, «la especie  $A$  se funda en la  $B$ , y por eso  $x$ , que pertenece a  $A$ , está fundado en  $y$ , que pertenece a  $B$ »

Husserl suele moverse de forma despreocupada de los individuos a las especies y viceversa (Fine 1995, pág. 465), cosa que, como se verá más adelante, no suele poder hacerse de una manera sencilla. Por añadidura, define la fundamentación de dos maneras, que parecen en principio incompatibles.

En lo referente a fundamentaciones genéricas, se tiene lo siguiente<sup>2</sup>:

- Fundamentación estricta (F): un  $A$  como tal requiere fundamentación por un  $B$  syss hay una ley esencial que dice que un  $A$  no puede existir como tal excepto en una unidad más comprensiva que lo asocia con un  $B$ .
- Fundamentación débil (WF): un  $A$  como tal requiere fundamentación por un  $B$  syss en virtud de la naturaleza esencial de un  $A$ , un  $A$  no puede existir como tal a no ser que exista un  $B$ .

La diferencia entre ambas es que en la segunda se omite la referencia a un todo más comprensivo. De acuerdo con la segunda definición, toda especie se auto-fundamenta. Esto es así porque resulta verdadero que «en virtud de la esencia de un  $A$ , un  $A$  no puede existir a no ser que exista un  $A$ », lo cual no puede suceder en la primera definición, porque la especie  $A$  no puede ser más comprensiva (más amplia) que la especie  $A$ , y por tanto no puede haber una ley esencial que lo enuncie. Además, al ser toda especie auto-fundamentada, según WF, todo objeto sería absolutamente dependiente, según el Teorema V: como un objeto relativamente no-independiente es también absolutamente no-independiente, y todo es relativamente no-independiente, se desprende que todo es absolutamente no-independiente. Pero parece claro que Husserl no sostiene eso, por lo que es seguro que no utiliza la noción de fundamentación débil cuando define la dependencia e independencia relativas.

<sup>1</sup>Perteneciente a la obra *Parts and moments. Studies in logic and formal ontology* (Künne y col. 1982).

<sup>2</sup>Para unificar el vocabulario, se utilizarán las denominaciones de Fine (Fine 1995, págs. 469-70): fundamentación estricta (*strict foundation*), representada por la F, y a la segunda, débil (*weak foundation*), representada con WF. En Simons, fundamentación estricta y amplia. (Simons 1982, págs. 123-6)

Una manera de evitar el problema sería añadir una cláusula que estableciera que ambas especies fundamentadas han de ser distintas. Pero la cláusula fallaría, ya que parece haber especies que se auto-fundamentan de manera no trivial. (Simons 1982, pág. 124)

Tras estas observaciones, las dos variantes de la fundamentación podrían reformularse así:

- $F(A, B)$ : necesariamente, si hay un B, entonces hay un A, y ni el A es parte del B, ni el B parte del A. De esta forma se expresa el concepto de dependencia, y se mantiene la idea de que el todo que forman es más comprensivo que el A o el B, ya que no pueden ser partes entre ellos.
- $WF(A, B)$ : necesariamente, si hay un B, entonces hay un A. Es en este sentido en el que se puede decir que un todo está fundamentado en sus partes, pudiéndose afirmar que si  $x$  es parte de  $y$ ,  $y$  está fundamentado en  $x$ , ya que no se impide que existan relaciones de partes.

Una vez han quedado definidas de forma más precisa las dos nociones de fundamentación, se pueden examinar en referencia a algunas propiedades interesantes: reflexividad, simetría y transitividad. (Simons 1982, págs. 127-8) Como se ha visto, WF es trivialmente reflexiva, es decir, toda especie se auto-fundamenta débilmente. Sin embargo, sólo algunas especies se auto-fundamentan de forma estricta. Un ejemplo de especie en la que sucede esto sería la de los hermanos: sólo puede haber un hermano, si hay al menos dos hermanos, ya que ser hermano significa ser hermano de otro (que también sería hermano respecto del primero). Así, para existir, esta especie necesita de la existencia de otro miembro de la especie, y por ello se auto-fundamenta.

Más arriba se definió la fundamentación bilateral como aquélla en la que un elemento depende de otro, y a la vez el segundo depende del primero. Parece claro entonces que este tipo de fundamentaciones sí son simétricas; en cambio, las unilaterales no lo son.

WF es transitiva, pero F no lo es. Se puede demostrar de la siguiente forma: si se tiene

- un  $a$  que pertenece a la especie  $A$ , un  $b$  que es  $B$  y un  $c$  que es  $C$ ,
- $F(A, B)$  y  $F(B, C)$ ,
- y se cumplen las condiciones de la definición de F: ni  $a$  es parte de  $b$ , ni  $b$  de  $a$ ; ni  $b$  es parte de  $c$ , ni  $c$  de  $b$ , entonces
- no se puede afirmar que  $a$  y  $c$  no sean partes el uno del otro, y por tanto no se puede afirmar  $F(A, C)$ .

Hasta ahora se ha tratado con versiones de la fundamentación genérica, es decir, en la que la relación de fundamentación se dice de especies. En lo referente a la fundamentación individual, aparecen otro tipo de dificultades.

Una de las principales es la que surge al tratar de relacionar la fundamentación genérica con individuos concretos. (Simons 1982, págs. 129-30) Y es que si se tiene  $F(A, B)$ , un individuo  $a$  que es  $A$ , y un  $b$  que es  $B$ , de ello no se puede colegir  $F(a, b)$ , pues sólo se sabe que los  $a$ 's fundamentan a los  $b$ 's, pero no se sabe si este  $a$  y este  $b$  concretos se encuentran en esa relación, o por el contrario este  $a$  fundamenta a otro  $b$ . Por ejemplo, sabemos que la especie de los esposos fundamenta a la de las esposas (y viceversa), y sabemos que Juan está casado (o sea, es esposo-de- $x$ , pertenece a la especie de los esposos) y María está casada, pero de esto no se puede deducir que Juan y María estén casados entre ellos. Esto es así porque la relación de fundamentación entre  $a$  y  $b$  es una relación concreta, singular, que no queda expresada en el enunciado general sobre las especies. Por lo tanto, parece que la fundamentación individual no puede descansar en la genérica, y ha de tomarse como primitiva.

Otro obstáculo aparecerá en el camino si se tiene en cuenta que un individuo puede caer bajo diferentes especies, y en tanto que cae en una u otra, mantener distintas relaciones de fundamentación con distintos individuos. (Simons 1982, págs. 131-2) Por ejemplo, en tanto que planeta, Júpiter se fundará en el Sol; en tanto que cuerpo pesado, lo hará en las propiedades de sus partículas componentes. Por tanto, a la hora de expresar las relaciones de fundamentación entre dos individuos, habrá que explicitar también en virtud de qué especies, de entre aquéllas a las que pertenecen, se relacionan:  $a$ , en tanto que  $A$ , fundamenta  $b$ , en tanto que  $B$ . Mediante los axiomas 11 y 12 (ver sección siguiente) Simons (Simons 1982, pág. 133) establece la conexión entre individuo y género, a grandes rasgos, de esta forma: los individuos están en relaciones de fundamentación en virtud de pertenecer a ciertas especies que se encuentran en fundamentación genérica.

## 5.2. Las simbolizaciones

Una vez presentados los problemas conceptuales, así como algunas sugerencias enfocadas a su solución, se está en condiciones de presentar algunas de las formulaciones simbólicas propuestas por diferentes autores, lo que supondrá una gran ayuda a la hora de determinar las posibles direcciones a seguir.

Debido a la variedad terminológica, se ha adoptado una nomenclatura unitaria, con ánimo de permitir una comparación más cómoda. Así, se utilizarán los siguientes símbolos:

- La nomenclatura mereológica que se ha empleado en el capítulo anterior: P, PP, O, etc.
- Fundamentación: F, WF.
  - Para los casos de fundamentación individual en los que se mencione en virtud de qué especie se da la conexión:  $F_{A,B}(a, b) = \langle\langle a, \text{en tanto que } A, \text{ se fundamenta en } b, \text{ en tanto que } B \rangle\rangle$

- Pertenencia a una especie:  $\epsilon$ . « $a$  es un  $A$ » se expresa:  $a \in A$
- Conectivas y cuantificadores:  $\rightarrow, \neg, \vee, \wedge, =_{def}, \exists, \forall$

A la hora de discutir algunos aspectos de la teoría de la fundamentación, sería obligatorio hacer uso de algunas expresiones de lógica modal. Por ejemplo, como se ha dicho, si un objeto es un momento, significa que necesariamente es complementado por otro objeto, mientras que si se trata de un pedazo, la complementación es posible, pero no necesaria. Sin embargo, dado que el tema de la necesidad no aporta nada, en principio, a la comparación que se va a llevar a cabo, esta simbología se omitirá.

Fine (*op.cit.*) y Blecksmith y Null (Blecksmith y Null 1991) proponen varios sistemas axiomáticos con la relación de fundamentación como primitiva<sup>3</sup>:

Fine
Fundamentación débil:
AWF1. $P(y, x) \rightarrow WF(x, y)$ AWF2. $WF(x, y) \wedge WF(y, z) \rightarrow WF(x, z)$ AWF3. $\exists y(WF(x, y) \wedge \forall z(WF(x, z) \rightarrow P(z, y)))$
Fundamentación estricta:
AF1. $F(x, y) \rightarrow \neg P(y, x)$ AF2. $F(x, y) \wedge F(y, z) \wedge \neg P(x, z) \rightarrow F(x, z)$ AF3. $F(x, y) \wedge P(x, z) \wedge \neg P(y, z) \rightarrow F(z, y)$ AF4. $F(x, y) \wedge P(z, y) \wedge \neg P(z, x) \rightarrow F(x, z)$ AF5. $\exists y(F(x, y)) \rightarrow \exists y(F(x, y) \wedge P(x, y) \wedge \forall z(F(x, z) \rightarrow P(z, y)))$
Blecksmith y Null <sup>4</sup>
A5. $P(x, y) \rightarrow WF(y, x)$ A6. $WF(x, y) \wedge WF(y, z) \rightarrow WF(x, z)$ A7. $WF(x, y) \neq WF(y, x)$ A8. $WF(x, y) \wedge WF(y, x) \rightarrow x \neq y$

Cuadro 5.1: Diferentes axiomatizaciones del concepto de fundamentación

Es necesario advertir que ambos autores se están refiriendo a la fundamentación entre objetos, y no entre especies. Fine afirma que resulta conveniente formular en primer lugar la fundamentación objetual, para después extender el sistema para incluir las especies. (Fine 1995, pág. 465) Ya se han visto, a través de las reflexiones de Simons, las dificultades que

<sup>3</sup>Se mantienen los nombres y numeraciones originales de los axiomas, definiciones y teoremas. Por brevedad y comodidad se omiten las cuantificaciones universales que se sobreentienden. P.ej.:  $Pxy \rightarrow WFyx$  debería ser  $\forall xy(Pxy \rightarrow WFyx)$ .

<sup>4</sup>Estos autores utilizan la letra F y no distinguen entre los dos tipos de fundamentación en el artículo citado, pero como puede verse en el axioma A5, se trata de la relación denominada más arriba WF, y por razones de coherencia se utiliza este nombre.

surgen si se trata de operar de manera inversa, al tratar de deducir las relaciones concretas a partir de las genéricas.

Todos los autores conciben la relación  $P$  como un orden parcial (reflexiva, antisimétrica y transitiva), pero Blecksmith y Null le añaden un cuarto axioma que llaman «de solapamiento» (*overlap*), usando  $O$  como primitivo:

$$A4. \forall yz(\forall x(P(x, y) \rightarrow O(x, z)) \rightarrow P(y, z))$$

Establece que todos los elementos que sean parte de un primero y se solapen con un segundo, son también parte de este segundo. Es decir, dos elementos se solapan sin comparten al menos una parte, lo que puede establecerse, sin necesidad de un axioma, definiendo  $O$  a partir de  $P$ :  $O(x, y) =_{def} \exists z(P(z, x) \wedge P(z, y))$

Blecksmith y Null sólo proponen un sistema axiomático para la fundamentación débil, y Fine propone uno para la estricta y otro para la débil, entre otros. El axioma A5 y el AWF1 son el mismo, y establecen que un todo está fundamentado en sus partes. Este es el significado básico de la WF que se adelantó más arriba de forma intuitiva, y que suele considerarse trivial, aunque como se verá después, puede llegar a alcanzar una mayor importancia.

Además, ambos conciben WF como transitiva, algo en lo que también estaba de acuerdo Simons. Sin embargo, F sólo es transitiva si, como se ha hecho en AF2, se añade la cláusula que no permite a los objetos ser partes entre sí, algo ya adelantado anteriormente también.

Según A7, WF no es simétrica, de donde se colige que se trata de la fundamentación unilateral, y no bilateral. Por A8, WF no es antisimétrica, lo que precisamente permite que haya casos de fundamentación bilateral, pues establece que si existe fundamentación en ambas direcciones, estos dos objetos no son el mismo, es decir, no identifica la fundamentación bilateral con la auto-fundamentación.

La auto-fundamentación se expresa mediante la reflexividad de la relación de fundamentación. Precisamente, el primer teorema (T1) que propone Fine (Fine 1995, pág. 471) es  $WF(x, x)$ . La prueba podría establecerse como sigue:

- La relación  $P$  es reflexiva:  $P(x, x)$
- En AWF1 se sustituye  $y$  por  $x$ :  $P(x, x) \rightarrow WF(x, x)$
- Se concluye  $WF(x, x)$

Fine no coloca entre los axiomas la no-simetría y la no-antisimetría, sino que añade un axioma, AWF3, que llama de «integridad». Este enunciado expresa el hecho de que existe algo así como un «todo comprensivo», o integral, en el que se fundan los objetos dependientes, y que contiene como partes todos los demás elementos en los que estos objetos se fundan. En otras palabras, es un todo que engloba todos los objetos de los que depende un objeto dado. De esta forma, siempre se pueden reducir las relaciones de fundamentación a una relación binaria que engloba a las demás.

En cuanto a su consonancia respecto de las ideas de Husserl, el sistema de WF resulta bastante aceptable. AWF1 no expresa sino la idea de que un todo está fundamentado en sus partes, lo cual, como se ha comentado, muy bien podría interpretarse a partir de las palabras de Husserl. El axioma AWF2, que expresa la transitividad, tampoco ofrece mayor problema, pues el propio Husserl hace uso de esta propiedad en sus teoremas (§ § 14, 17, 24, Husserl 2006a, págs. 412, 416, 428). Del último axioma, AWF3, no parece haber evidencia textual directa, pero resulta coherente a la luz del resto de conceptos.

Al ser WF una noción más débil o amplia que F, engloba, entre otros, los casos en los que se cumple F. El resto de casos serán aquéllos en los que el elemento fundamentador es parte del fundamentado. Por tanto, F puede ser definida a partir de WF y viceversa:

- $D(F/WF).F(x, y) =_{def} WF(x, y) \wedge \neg P(y, x)$
- $D(WF/F).WF(x, y) =_{def} F(x, y) \vee P(y, x)$

Así, los sistemas formados por F y WF son deductivamente equivalentes (Fine 1995, pág. 471). Podría apoyarse entonces la aceptación de los axiomas de F por el simple hecho de que es equivalente a WF, y éste es aceptable. Sin embargo, pueden esgrimirse razones más sólidas si se examinan los axiomas uno por uno:

AF1 simplemente pone de manifiesto un fenómeno que se ha mencionado varias veces a lo largo de la exposición, y que tiene base textual en Husserl: que la relación de fundamentación estricta sólo se da entre objetos que no se encuentra en relación de partes, es decir, que si  $a$  fundamenta  $b$ ,  $a$  no es parte de  $b$ .

AF2 expresa la transitividad de la relación, la cual ya se ha mostrado utilizada por Husserl, introduciendo la cláusula necesaria, como se ha visto antes, que impide que el primer y último elemento de la cadena sean partes entre sí.

AF3 y AF4 expresan la misma idea pero, por así decirlo, a la inversa:

- Si una parte de un todo está fundada en un objeto externo a dicho todo, el todo entero está fundado en ese objeto externo.
- Si un objeto externo a un todo está fundado en dicho todo, también está fundado en las partes de ese todo.

Como puede verse, en el primero se describe la relación entre las partes de un todo y un objeto externo, y en el segundo, entre un objeto externo y las partes de un todo. AF3 sirve para probar el Teorema 1 de Husserl y, de hecho, observando el significado de ambos, resultaría difícil aceptar el uno y rechazar el otro. (Fine 1995, págs. 466-67) De AF4 no parece haber evidencia textual directa, pero dada su estrecha relación con AF3, también se presenta más que aceptable.

Por último, AF5 expresa la idea, a menudo repetida por Husserl<sup>5</sup>, de que los objetos en relación de fundamentación estricta conforman un todo mayor que ambas partes por separado, una unidad.

Hasta el momento, se han tratado sistemas simbólicos que intentan codificar las nociones de Husserl en torno a la fundamentación entre objetos. Se pueden mostrar entonces algunas sugerencias para introducir a las especies en escena.

Simons (Simons 1982, págs. 125-6) define de esta manera los dos tipos de fundamentación:

- $F(A, B) =_{def} \forall x(x \in A \rightarrow \exists y(y \in B \wedge \neg P(x, y) \wedge \neg P(y, x)))$
- $WF(A, B) =_{def} \forall x(x \in A \rightarrow \exists y(y \in B))$

La especie  $B$  fundamenta débilmente la  $A$  si por cada  $a$  existe un  $b$ . En la versión fuerte, los  $a$  no pueden ser parte de los  $b$  y viceversa. Sin embargo, no basta con introducir la relación de instanciación ( $\epsilon$ ) entre especies y objetos. Los objetos se fundamentan entre ellos en virtud de la pertenencia a ciertas especies. Por tanto, cuando se enuncia una fundamentación entre objetos, se está afirmando que tales objetos están en esa relación entre ellos, mientras que, a través de la fundamentación genérica, se puede expresar por qué esos objetos se fundamentan entre ellos: porque pertenecen a ciertas especies, según las cuales poseen ciertas propiedades. Por esto se necesitan, además de la relación de instanciación, reglas que relacionen la fundamentación genérica con la objetual o individual. Se podrían añadir al sistema elegido, entonces, los siguientes axiomas (Simons 1982, pág. 133):

- (11)  $\Box F_{A,B}(x, y) \rightarrow (x \in A \wedge y \in B \wedge F(A, B) \wedge \neg P(x, y) \wedge \neg P(y, x))$
- (12)  $\Box F(A, B) \rightarrow \forall x(x \in A \rightarrow \exists y(F_{A,B}(x, y)))$

El símbolo « $\Box$ » de necesidad parece de obligado uso en esta ocasión, pues sólo a través de él se puede expresar que, por una necesidad que se da en virtud del carácter sintético *a priori* de la ley que correlaciona las dos especies, los individuos de una especie fundamentan a los de la otra.

Por último, sólo resta examinar cuál sería el resultado de la simbolización de los teoremas propuestos por Husserl. Esta formulación se encuentra en Fine 1995, págs. 466-69<sup>6</sup>:

1.  $\exists xy(x \in A \wedge y \in B \wedge F_{A,B}(x, y)) \rightarrow \forall z(\exists x(x \in A \wedge P(x, z)) \wedge \neg \exists y(y \in B \wedge P(y, z)) \rightarrow \exists y(y \in B \wedge F(z, y))$

<sup>5</sup>Por ejemplo, § 5, (Husserl 2006a, pág. 394), hablando de la no-independencia: «El contenido está, según su esencia, unido a otros contenidos. No hace falta insistir en que esos otros contenidos forman una unidad con el primero.»

<sup>6</sup>Las pruebas se encuentran en Fine 1995, págs. 466-69. La mayoría son consecuencias triviales de las definiciones. La formulación de Simons 1982, págs. 127, 142-46 es muy similar.

2.  $(P(x, z) \wedge F(x, y) \wedge \neg P(y, z)) \rightarrow DP(z) \wedge \forall w(P(x, w) \wedge P(z, w) \wedge IW(w) \rightarrow DP_w(z))$
3.  $IP(x, y) \wedge IP(y, z) \rightarrow IP(x, z)$
4.  $DP(x, y) \wedge P(y, z) \rightarrow DP(x, z)$
5.  $DP_y(x) \rightarrow DP(x)$
6.  $IP(x, z) \wedge IP(y, z) \rightarrow I_y(x)$

Los teoremas hacen uso de las siguientes definiciones:

- (D1) Concepto de parte dependiente:  $DP(x) =_{def} \exists x(F(x, y))$
- (D2) Todo independiente:  $IW(x) =_{def} \neg DP(x)$
- (D3) Parte relativamente dependiente:  $DP_z(x) =_{def} \exists y(P(y, z) \wedge F(x, y))$
- (D4) Relación de parte independiente:  $IP(x, y) =_{def} P(x, y) \wedge \neg \exists z(P(z, y) \wedge F(x, z))$
- (D5) Relación de parte dependiente:  $DP(x, y) =_{def} P(x, y) \wedge \exists z(P(z, y) \wedge F(x, z))$
- (D6) Parte relativamente independiente:  $I_z(x) =_{def} \neg \exists y(P(y, z) \wedge F(x, y))$ <sup>7</sup>

Partiendo de este vocabulario se podría, además, simbolizar algunas de las ideas que Husserl utiliza, pero que no considera teoremas. Por ejemplo, que una fundamentación fuerte da lugar a una unidad mayor:  $F(x, y) \rightarrow DP(x, x + y)$ , siendo «x + y» la suma o agregado de x e y. (Simons 1982, pág. 139)

### 5.3. Conclusiones

A través de un concepto como el de fundamentación se estaría en condiciones de establecer ontológicamente la diferencia entre dos entidades con las mismas partes pero una estructura diferente. Esto es así porque realmente, sí diferirían en una parte, aunque sea abstracta: la estructura. Además, las propiedades emergentes, que dependen justamente de una organización y una dinámica de las partes, también serían expresables en esta ontología, lo que resulta ya no altamente conveniente, sino necesario, por ser un rasgo fundamental de la complejidad.

Se ha visto que ambos sistemas tienen una base textual, al menos parcial, en la obra de Husserl. Sin embargo, no es la pretensión de esta tesis la de apegarse completamente a la filosofía de Husserl. Se han presentado sus ideas como una aportación de gran importancia para la mereología, y en ese contexto, se ha tratado de exponerlas de manera fiel. Sin embargo, una vez aclarado su origen, dichas ideas se están considerando herramientas útiles para un propósito concreto, y por tanto se simplificarán, adaptarán o modificarán en orden a dicho fin.

<sup>7</sup>Léase «x es relativamente dependiente de z».

Por lo general, la fundamentación entre especies no será necesaria, y sólo se hará uso de la objetual. Sin embargo, como se ha visto, resulta sencillo relacionar ambas a través de ciertos axiomas adicionales, en caso de ser necesario.

En el capítulo 7 se presentará la propuesta completa, articulada con las otras teorías necesarias para desarrollar una ontología de los sistemas complejos.

# Capítulo 6

## Una ontología de niveles

### 6.1. La noción *husserliana* de nivel

En los parágrafos §19 y §20 de la tercera investigación, en los que Husserl reflexiona acerca de las partes próximas y remotas, se expresan muchos pensamientos en estrecha relación con lo que se denominará «nivel». Conviene por ello exponerlos como introducción al tema en cuestión.

Si se toma una melodía –propone Husserl–, se observará que la cualidad del sonido «no es parte de la melodía sino en tanto en cuanto es parte del sonido singular; a éste pertenece inmediatamente; al todo formado por los sonidos pertenece sólo mediatamente. Esta “mediatez” no se refiere, pues, aquí a una preferencia arbitraria, o condicionada por alguna coacción psicológica, en favor de cierto proceso de división que hubiera de conducirnos primero al sonido y luego a su momento de cualidad; sino que en sí el sonido es en el todo de la melodía la parte primera y su cualidad es la parte segunda, mediata.» (§ 19, Husserl 2006b, pág. 418) Es posible que se tomen gradaciones de partes arbitrarias, y que la parte que según un criterio de división se presentara como mediata, en otro puede considerarse inmediata. Sin embargo, también existen divisiones de partes que poseen un sostén objetivo: las relaciones de dependencia y fundamentación. Si se tomara una distancia, y se dividiera por la mitad, y cada parte también por la mitad sucesivamente, las relaciones de proximidad de esas partes con respecto del todo no tendrían más fundamento que si se escogiera la relación de división por tercios. Esto sucede así porque una distancia no está fundamentada en las partes en las que arbitrariamente se puede descomponer. Por el contrario, sí es cierto que la cualidad es un momento del sonido, es dependiente de él, y por ello es necesario que forme parte del sonido en primer lugar para poder ser, en segundo lugar, una parte de la melodía. Se establecen así unas relaciones de proximidad basadas en conexiones necesarias, pudiéndose hablar de partes próximas y remotas en general, o con más precisión, de partes primarias, secundarias, etc. todo ello con relación al todo al que pertenecen.

Por otra parte, si se consideran las relaciones de proximidad entre partes no respecto al todo del que son elementos, sino por su relación mutua, también se puede hablar de proximidad relativa. Como se dijo en la página 58 al hablar de los enlaces, si se tiene una cadena de elementos relacionados « $abc$ », y resulta que  $R(a, b)$  y  $R(b, c)$ , se tiene que la relación entre  $a$  y  $b$ , así como entre  $b$  y  $c$ , es inmediata, mientras que entre  $a$  y  $c$  es mediata. Los inmediatos son más próximos, relativamente, que los mediatos.

Si se imagina «una figura de estrella compuesta de otras estrellas, las cuales se componen de segmentos y finalmente de puntos. Los puntos fundan segmentos; los segmentos fundan, como nuevas unidades estéticas, las estrellas particulares, y éstas a su vez fundan la figura de estrella, como suprema [...] se observará que [...] [h]ay entre ellos una gradación fija de fundamentaciones, en la cual lo fundado en un grado se convierte en fundamento para el grado inmediato superior y de manera tal, que en cada grado son determinadas ciertas formas nuevas que sólo en ese grado son accesibles.» (§ 24, Husserl 2006b, págs. 428-9) Los segmentos están fundamentados en los puntos, a su vez, las estrellas en los segmentos, y así, estas relaciones van conformando una gradación en la que la composición crece. Al enunciar un principio general, Husserl denomina a estos grados «órdenes»:

Partes mediatas o remotas del todo de que son pedazos, serán esencialmente aquellos pedazos que con otros pedazos estén unidos en todos, merced a las formas enlazadoras, constituyendo estos todos a su vez unos todos de orden superior, gracias a las formas nuevas. (§ 24, Husserl 2006b, pág. 429)

Este concepto de orden es el que sirve de base para el desarrollo de la idea de nivel, la cual será clave para llevar a cabo una reinterpretación más completa de las ideas mereológicas de Husserl.

## 6.2. La necesidad de los niveles

Imaginemos que se pretende llevar a cabo un estudio sobre cualquier sistema natural, por ejemplo, un hormiguero. Es patente que se puede enfocar el análisis desde una gran variedad de puntos de vista. Por ejemplo, es factible contemplarlo en tanto que compuesto químico, y realizar una investigación acerca de los elementos que componen cada tipo de hormiga, las feromonas, las partes del alimento que aprovechan, los minerales del terreno, etc. También podría atenderse al hormiguero en tanto que conglomerado de piezas móviles y rutas, y describir así sus velocidades, trayectorias, etc. La perspectiva ontológica, por su parte, escudriñaría el objeto en tanto que tal, y las propiedades que, por ser objeto, le pertenecen.

Al seguir indagando en esta dirección ontológica de análisis se puede llegar, como propone Husserl, a la distinción entre objetos simples y compuestos. En cuanto que algo es un objeto, puede poseer partes o no poseerlas. En la medida en que posea o no partes,

y si las posee, según éstas se relacionen, el objeto poseerá unas propiedades u otras, que podrían ser descritas mediante los teoremas de la mereología. Así, se podría dar cuenta de la estructura de los objetos a través de las nociones de parte y fundamentación. Sin embargo, sucede que aún podría faltar una herramienta nada accesoria a este acervo, pues, ¿se podría decir que una hormiga es parte del hormiguero de la misma forma que un átomo de carbono es parte de la hormiga, o que una mano es parte del cuerpo en el mismo sentido, o al mismo nivel, que una célula?

Al examinar un objeto en tanto que es compuesto, se observará que existen en él, por lo general, varios niveles de composición, unos de los cuales se sustentan en otros. Así, los átomos componen, por una parte, células, y por otra, ciertos minerales. Las células componen tejidos, y éstos órganos, y éstos sistemas. Ciertos minerales componen los huesos. Una mano sería una porción del cuerpo compuesta de huesos, atravesada por la piel, el sistema muscular, el circulatorio, etc. Es decir, que la mano se encuentra en un nivel de composición muy alto en comparación con los átomos o las células, y en definitiva su existencia se apoya, sostiene o fundamenta en la existencia de conglomerados organizados de estos elementos más simples.

Por tanto, a la hora de tratar con entidades como los sistemas complejos, los cuales se dividen en niveles jerarquizados, y que precisamente por ello poseen ciertas propiedades específicas, parece que se hace necesario integrar en el lenguaje ontológico destinado a describirlos, cierto vocabulario que permita expresar estos hechos peculiares.

### 6.3. Distintos acercamientos

Han sido varios los autores que, por distintas razones, han visto necesario el desarrollo de una ontología de niveles. Ya se han visto algunas menciones a los niveles en Simon o Polanyi, pero ha llegado el momento de estudiar propuestas más elaboradas. Como se afirma en *Explaining emergence: towards an ontology of levels* (Emmeche, Koppe y Stjernfelt 1997), el estudio de los niveles está directamente relacionado con el estudio de la emergencia. El gran problema de la emergencia es la imprecisión del término. De modo que es posible que a través del concepto de nivel, pueda darse una definición más rigurosa de éste.

Los niveles, según estos autores, serían entidades inclusivas, en el sentido de que las leyes del nivel superior no pueden violar las del inferior. (Emmeche, Koppe y Stjernfelt 1997, pág. 105) Así, en el mundo existirían otras entidades aparte de las partículas elementales, las cuales son independientes del sujeto que conoce, y se hallan íntimamente relacionadas con la organización de las partes: un nivel difiere de sus partes en una organización superior.

Se trata de identificar cada nivel primario con una ciencia, y cada subnivel, con una rama de esa ciencia, al menos de forma aproximada. (Emmeche, Koppe y Stjernfelt 1997, págs. 106-7) Así, se tendrían los niveles físico, biológico, psicológico y sociológico. Dentro del biológico, se tendría el subnivel celular, el organísmico, etc.

Las emergencias serían, entonces, los «saltos» que se dan tanto entre niveles, como entre subniveles. Es decir, lo biológico emergería de lo físico, y dentro de lo biológico, lo orgánico emergería de lo celular. Siguiendo con las ideas de Polanyi, se afirma que cada nivel restringe las posibilidades de acción de los inferiores, creando condiciones de frontera. Los niveles primarios quedarían definidos por estas condiciones de frontera (Emmeche, Koppe y Stjernfelt 1997, pág. 108), que marcan de alguna forma las reglas del juego que el resto de niveles inferiores han de acatar, y así sucesivamente.

Hasta ahora se ha hablado del funcionamiento de los niveles. En cuanto a la génesis, un nivel surgiría de la siguiente manera (Emmeche, Koppe y Stjernfelt 1997, págs. 108-112): las entidades primarias se organizan en una nueva estructura de relaciones. Estas relaciones son las leyes básicas de ese nivel. A su vez, las entidades de los subniveles se reproducen, dando lugar a repeticiones de las emergencias que hicieron aparecer esos subniveles. (Las entidades primarias son aquéllas que resultan centrales para una gran población de niveles superiores.)

De nuevo, trabajando acerca de la emergencia, se trae a colación el concepto de nivel. Baas y Emmeche, en *On emergence and explanation* (Baas y Emmeche 1997), pretenden ofrecer una definición matemática de la emergencia, ya que consideran que las ciencias de la complejidad tratan de explicar los fenómenos emergentes (de orden superior) a través de los de orden inferior, siendo la emergencia un concepto central. El reto consiste en sortear el dilema entre el reduccionismo y el holismo y a la vez saber captar, en la definición, el dinamismo, la dependencia del contexto y las hiperestructuras. El término hiperestructura hace referencia a todo fenómeno que sucede en un nivel superior al que se está tratando. Por ejemplo, la observación sería una hiperestructura respecto de lo observado.

De forma intuitiva, la emergencia se presenta como el comportamiento colectivo de una gran colección de objetos que interactúan. Adoptando el siguiente vocabulario:

- S = familia de sistemas o agentes,
- Int = interacción entre agentes,
- Obs = observador,
- R = resultado de la observación, se puede expresar la estructura emergente de la siguiente manera:
- $S^2 = R(S_i^1, Obs_1, Int_1)$

Donde  $i$  es el número, finito o infinito, de sistemas o agentes y el superíndice numérico marca el nivel. Así, la estructura emergente en el nivel 2 es el fruto de la observación de la interacción entre los agentes en el nivel 1.

A partir de esta definición se puede enunciar la de propiedad emergente como aquella propiedad P que pertenece a  $Obs^2(S^2)$  y no pertenece a  $Obs^2(S^1)$ . Es decir, P pertenece a la estructura emergente y no a la originaria.

Se introduce una noción muy amplia de observador. Éste puede ser tanto un aparato de medida como el entorno de interacción. Se considera una noción necesaria porque, afirman los autores, los fenómenos tienen que ser explicados a través de hechos observacionales. Por ejemplo, una célula con su membrana podría constituir el observador de algunos de los aspectos de su entorno inmediato. Este lenguaje permite entonces expresar desde experimentos de laboratorio hasta fenómenos evolutivos.

La noción de hiperestructura vuelve a ser tratada por Baas en *New structures in complex systems* (Baas 2009), donde se estudia la emergencia de nuevas estructuras topológicas a partir de uniones de estructuras más sencillas. Estudiando los mecanismos generales de formación de hiperestructuras se podría comprender cuándo y cómo emergerán nuevas propiedades en los materiales.

Wimsatt, en *The ontology of complex systems* (Wimsatt 1994) también trata de explicar la emergencia a partir de niveles, a los que llama «niveles de organización». Por éstos entiende:

By level of organization, I will mean here compositional levels –hierarchical divisions of stuff (paradigmatically but not necessarily material stuff) organized by part-whole relations, in which wholes at one level function as parts at the next (and at all higher) levels, though one of the features of levels [...] is that levels are usually decomposed one level at a time, and only as needed. (Wimsatt 1994, pág. 222)

Como novedad, se introduce de forma explícita el componente mereológico: los todos de un nivel son partes del siguiente. Wimsatt considera, siguiendo a Simon (Wimsatt 1994, pág. 225), que esta estructura de niveles es una característica profunda de la realidad, algo esencial en la ontología del mundo natural. Algunas de las características más destacables de los niveles son las siguientes (Wimsatt 1994, págs. 233-259)<sup>1</sup>:

- a) Los niveles se organizan en jerarquías, siendo los componentes de los inferiores partes de los componentes de los superiores.
- b) Cuanto más alto es el nivel, mayor es el tamaño relativo.
- c) Estos rangos de tamaño afectan a la significación de las interacciones: sólo los objetos en el mismo rango interactúan de forma significativa.
- d) Aunque el tamaño no es un indicador suficiente del nivel.
- e) «Of two entities, if one relates to the other's properties as part of an average, but the second relates to the first as an individual, the first is at a higher level of organization than the second.» (Wimsatt 1994, pág. 237) Esto permitiría ordenar entidades que no están en la misma jerarquía composicional, es decir, en la misma cadena de relaciones parte-todo.

---

<sup>1</sup>La numeración mediante letras no se corresponde con la original.

- f) Los niveles pueden ser pensados como máximas locales de regularidad y predictibilidad en el espacio de posibles ordenaciones de la materia.
- g) La evolución consiste en
  - a) Hacer el entorno predecible y hacerse impredecible a los depredadores.
  - b) Adaptarse a las regularidades de tantos niveles como se pueda: agrandar el nicho y las posibilidades de supervivencia.
- h) Un nivel de organización es más como un ecosistema que como una especie, ya que evoluciona como un producto de las trayectorias de las entidades que lo componen.
- i) Los procesos de niveles altos tienden a tener lugar a velocidades más bajas que los procesos de niveles bajos. Esto se suele deber a que lleva más tiempo propagar efectos a largas distancias (y, como se ha dicho, el tamaño suele crecer con el nivel).

Además de los niveles, Wimsatt habla de perspectivas<sup>2</sup>. (Wimsatt 1994, 159 y ss.) Éstas serían cortes cuasi-subjetivos sobre los fenómenos de un sistema. Las perspectivas aparecen porque la complejidad de los niveles va creciendo, de manera que se vuelven más difusos y se solapan con otros niveles vecinos. Por esto, una perspectiva no tiene por qué coincidir con la partición natural de un nivel, sino que puede ser sólo una parte de uno, o una reunión de fragmentos de varios. Dado que una perspectiva sólo aporta información parcial acerca del sistema de que trata, se suelen requerir varias perspectivas acerca de un sistema para tener una visión de todo el conjunto. Por ejemplo, la anatomía, la psicología y la genética son perspectivas diferentes sobre el organismo (aunque las perspectivas no tienen por qué coincidir siempre con disciplinas científicas).

## 6.4. Conclusiones

Pueden ser encontrados muchos otros trabajos sobre ontología de niveles, como los artículos de Roberto Poli (Poli 2001; Poli 1998) o la serie de artículos de Baianu y compañeros, de alto contenido científico (Baianu, Brown y Glazebrook 2007; Baianu, Brown y Glazebrook 2007; Baianu 2007; Brown, Glazebrook y Baianu 2007). Sin embargo, para los presentes propósitos, la muestra escogida resulta bastante representativa, pues se tienen algunas enumeraciones de características que habría de tener el concepto de nivel, así como una definición mediante un lenguaje simbólico.

La introducción de los todos y las partes en el trabajo de Wimsatt resulta esencial para este trabajo, pues se ha de notar que en cierta medida, la propia noción de parte ya trae consigo, o utiliza de forma implícita, la noción de nivel. Si A es parte de B, y B lo es de C, parece obvio que A está en un nivel inferior a B, y B está en un nivel inferior a C. Sin

---

<sup>2</sup>Ver también Wimsatt 1972, donde explora la idea de la aparición de perspectivas en los sistemas suficientemente complejos, en los que los límites de los subsistemas se entrecruzan.

embargo, esto sólo nos daría una descripción relativa de los niveles, de forma que cuando, dentro del mismo objeto, se establecieran, por ejemplo, al menos dos líneas descendentes diferentes de partes consecutivas por ejemplo: 1)  $Pab, Pbc$  y 2)  $Prs, Pst$ ) ya no se podría estar seguro de las posiciones absolutas que mantendrían las distintas líneas de partes, a menos que los niveles se fijaran de manera explícita y absoluta.

Se han llamado líneas descendentes, ya que descienden en el nivel de composición, y son consecutivas porque existe una parte intermedia que hace de eslabón entre otras dos ( $b$  entre  $a$  y  $c$ ;  $s$  entre  $r$  y  $t$ ), formando una cadena, usando una idea similar a las jerarquías de composición de Wimsatt. Así, mirada cada línea de forma independiente, se deduce que  $a$  está en un nivel inferior al de  $b$ , y  $b$  en uno inferior al de  $c$ , y lo mismo sucede respecto de  $r$ ,  $s$  y  $t$ . Sin embargo, contando solamente con estos datos, ¿se podría establecer la relación entre las posiciones de  $a$  y  $r$  en la escala de composición, los cuales no se encuentran, en principio, en una relación de partes? La respuesta es no, a no ser que se introduzca el concepto de nivel, y se definan de manera explícita y absoluta los niveles que atraviesan el objeto. En cuanto cuestión de estructura abstracta, la operación de definición de niveles es meramente lógica y numérica, una vez que se hubieran hecho explícitas las reglas que gobiernan el concepto de nivel. En cuanto cuestión empírica, referida a objetos concretos, constituiría una tarea más bien experimental: es una cuestión científica, de observación y teoría, el establecer que la célula es el elemento básico de los organismos, estudiar sus componentes, sus bases químicas, etc. Esta última observación es la que parece hacerse en la característica e) de Wimsatt: las relaciones parte-todo no siempre son suficientes para ordenar todas las entidades.

En cuanto a la definición de emergencia de Baas y Emmeche, aunque tiene la virtud de acercar la ontología a la lógica y las matemáticas, lo cual resulta de mucha importancia para los propósitos de esta tesis, tiene la desventaja de, en primer lugar, simplemente dar por hecho el concepto de nivel, y en segundo lugar, utilizar la noción de observador, quizá poco clara y que podría ser fácilmente reducible a las relaciones entre el sistema y el entorno. Por ello, su propuesta, pese a su utilidad, aún demanda una definición estricta de los niveles, así como de los conceptos de agente, sistema o relación.

También se han visto las relaciones entre los niveles y las condiciones de frontera de forma algo más clara: las condiciones de frontera no serían sino las reglas o leyes de un nivel, que han de ser acatadas por los niveles superiores, y que no pueden violar las leyes de los inferiores. Y esto es debido a la forma de la propia génesis del nivel, puesto que un nivel surge de las relaciones entre sus elementos principales, regidas por las leyes del nivel inferior. De este modo, la aparición de un nivel supone en cierto sentido una restricción de las relaciones de los elementos inferiores.

Teniendo en cuenta estas observaciones, se pueden adelantar ya algunas de las nociones que una ontología de niveles debería contener, aunque serán completadas en el capítulo siguiente de manera más rigurosa:

1. Si  $X$  es parte de  $Y$ ,  $X$  está en un nivel inferior a  $Y$ .

- a) Corolario 1: se pueden establecer niveles relativos entre objetos basándose en la relación de partes.
  - b) Corolario 2: si X está en un nivel inferior a Y, X no tiene por qué ser necesariamente parte de Y. Esto es así porque el hecho de conocer el nivel de un elemento no aporta la información suficiente para conocer de qué objeto es parte, o si es parte del alguno.
2. En principio, se han de poder establecer los niveles de una forma absoluta, con el fin de eliminar la ambigüedad de los niveles relativos. El criterio objetivo para este establecimiento, como ya adelanta Husserl, son las relaciones de fundamentación. La existencia de los elementos de un nivel superior depende de la existencia y la configuración concreta de relaciones de los niveles inferiores.

## Una propuesta ontológica

### 7.1. Una teoría de la fundamentación

Se ha visto cómo Husserl emplea la fundamentación para definir las partes dependientes, también denominadas abstractas. Se ha de recordar también que esta dependencia se puede relativizar, y lo que es dependiente en un contexto, se puede considerar independiente en otro, aunque también existan objetos absolutamente dependientes. Como las partes abstractas resultarán esenciales a la hora de lidiar con una ontología de sistemas complejos, ha llegado el momento de elegir de qué manera se usará el concepto de fundamentación.

El sistema axiomático de Fine será propuesto, al final de este capítulo, como un candidato aceptable para expresar las relaciones de dependencia y fundamentación. Este autor utiliza dos conceptos primitivos,  $F$  y  $WF$ , los cuales tienen propiedades diferentes pero son interdefinibles. El primero, la fundamentación fuerte, parece orientado a expresar fenómenos del estilo de «la entidad  $a$  depende de la entidad  $b$ , y por ello forman un todo más amplio». La segunda, fundamentación débil, puede expresar el hecho de que un todo está fundamentado en sus partes. Estas nociones parecen útiles, por tanto, a la hora de lidiar con partes abstractas o no extensionales. Sin embargo, pueden plantear algunos problemas a la hora de enfrentar ciertos fenómenos, los cuales podrían ser atenuados haciendo uso de algunas nociones auxiliares.

#### 7.1.1. Algunas carencias de la fundamentación

Al afirmar  $F(a, b)$  se está diciendo, *grosso modo*, que la existencia de la entidad  $a$  depende de la existencia de la entidad  $b$ , es decir, que si  $b$  existe, entonces  $a$  existe. Esto parece convenir muy bien a sistemas naturales orgánicos, como los animales. En este tipo de entidades, estas relaciones de fundamentación fuerte se dan de forma constante. Por ejemplo, la existencia de los tejidos del cuerpo depende de la existencia de un proceso denominado circulación sanguínea, que irriga las células que componen estos tejidos. A su vez, la existencia de sangre depende, entre otras cosas, de la alimentación,

que a su vez depende de otros fenómenos, entre ellos ciertas acciones conjuntas de los tejidos (musculares: buscar alimento; cerebrales: aprender, modificar conductas; etc.). Sin embargo, este tipo de fenómenos no parece darse en lo que cabría denominar sistemas artificiales.

Un ejemplo de sistema artificial sería un automóvil. Las piezas de éste (carrocería, chasis, ruedas, motor, etc.) pueden existir separadamente; sin embargo, cuando se encuentran juntas y organizadas de cierta manera, funcionan en consonancia y permiten la consecución de objetivos que las partes por sí solas no permiten. Sus partes, por tanto, no están relacionadas tan fuertemente como en un organismo, pero tampoco tienen una relación tan débil como la que se da en los meros agregados o montones.

Sin embargo, desde el punto de vista de del uso de  $F$  y  $WF$ , no se podrían expresar estas diferencias. En primer lugar, ambos todos –el automóvil y el animal– estarían débilmente fundamentados en sus partes. El problema surge cuando se hace notar que también una masa de agua, un montón de piedras o un taco de folios se fundamentan débilmente en sus partes. Éste es uno de los grandes problemas de la mereología: el de los todos arbitrarios y los objetos compuestos de partes dispersas.  $WF$ , la fundamentación débil, constituye por tanto, una fundamentación «demasiado débil».

Por su parte,  $F$ , se presenta como un fenómeno «demasiado fuerte». Si la definición rigurosa de lo que sea un todo, y a la postre, de lo que sea un sistema, se han de dar exclusivamente en base a esta noción, se dejarían fuera demasiadas entidades que podrían ser consideradas todos. Y es más, como se verá más adelante, estos conceptos tampoco son suficientes para ofrecer una caracterización satisfactoria de los niveles ni, en última instancia, de muchas de las propiedades básicas de los sistemas complejos.

Como se acaba de ver, la distinta «fortaleza» de los todos depende en gran medida de la clase de relaciones que exhiben sus partes. Es necesario, por tanto, llevar a cabo una elucidación de algunas características de las relaciones si se pretende completar la noción de fundamentación que ofrecen  $F$  y  $WF$  para así, finalmente, poder distinguir entre distintos tipos de todos y sistemas.

### 7.1.2. Sobre las relaciones y su fuerza

Se ha afirmado de manera continuada que lo importante de un sistema no son sólo sus componentes, sino también las relaciones entre éstos. Existe, sin embargo, una gran discusión acerca de la naturaleza misma de las relaciones, llegando algunos a afirmar que no son entidades propiamente dichas, pues no aumentan la población ontológica del mundo. En esta tesis se adoptará una posición que acepta la existencia de las relaciones como un tipo de entidad más. Se acepta, por tanto, que no resultan equivalentes estos dos estados de cosas:

- Dos objetos
- Dos objetos, uno de los cuales gira en torno al otro

La relación « $x$ -gira-en-torno-a- $y$ » añade algo a la primera situación. No se puede decir que una entidad tal tenga el mismo tipo de existencia que los objetos, al menos en este nivel de análisis<sup>1</sup>, puesto que la relación depende, en cierto sentido, de otras entidades para existir. Pero tampoco se puede decir que no tenga ningún tipo de existencia, puesto que su desaparición cambia la situación y por ello su entidad no puede ser reducida a los objetos de los que depende.

Uno de los problemas<sup>2</sup> más graves que pueden surgir con la posición que acepta la realidad de las relaciones es la de la multiplicación innecesaria de las entidades. Por ejemplo, existen relaciones más débiles que «girar en torno a», como «estar al lado de» o «estar a  $x$  distancia de». Si nos empeñamos, podríamos decir que todo objeto está a cierta distancia de otro, teniendo así una cantidad ingente de relaciones entre todos los objetos del mundo.

Otro tipo de relaciones que parecen poblar el mundo sin «aportar» demasiado son las que comúnmente se llaman abstractas. Por ejemplo, «ser del mismo color que» o «ser idéntico a». Ambas son relaciones lógicas (una relación de equivalencia y la relación de identidad).

Por último, parece que también las relaciones que en cierto sentido son equivalentes aumentan de forma innecesaria la población de entes. Por ejemplo, «el gato está encima de la alfombra» y «la alfombra está bajo el gato» presentan la misma situación. ¿Se trata entonces de dos relaciones diferentes, o sólo de una?

En cuanto al primer ejemplo, convendría distinguir entre relaciones débiles y fuertes, al menos dentro de un determinado contexto. Es cierto que, si se está tratando con un sistema concreto, como en el ejemplo del atasco, el hecho de que la carretera esté a  $x$  kilómetros de Júpiter es algo que no aporta nada al estudio. Se podría considerar una relación débil o despreciable en ese contexto. Sin embargo, esto no quiere decir que la relación en cuestión sea irreal. Existe la carretera, existe Júpiter y existe la distancia, y por tanto es cierto que «la carretera está a  $x$  kilómetros de Júpiter». Habría que aceptar, al menos en el caso de las distancias y demás relaciones espaciales, que por el mero hecho de que los entes se encuentren en el espacio, están imbuidos en una vasta red de relaciones. Lo que sucede es que, en la mayoría de los casos, estas relaciones no nos interesan en absoluto. Es posible que esto suceda con muchos otros tipos de relaciones, como las temporales (« $x$  sucedió antes que  $y$ », etc.) y es probable que un idéntico argumento pueda aplicarse a ellas.

En lo referente a las relaciones abstractas, resulta más que aceptable la sugerencia de Simons de diferenciar entre relaciones reales e ideales. (Simons 1982, págs. 153-55) Las relaciones ideales son las que dejan los objetos sin afectar, no suponen una diferencia para ellos. Por ejemplo: diferencia, similitud, tener el mismo peso, relaciones lógicas como las propuestas en el ejemplo, etc. Las relaciones reales son las que, de no existir, las propiedades o comportamientos de los relatos serían diferentes. Por ejemplo: nexos causales, relaciones espaciales dadas por movimientos, tamaño, calor, velocidad, etc. En

<sup>1</sup>Puesto que a otro nivel, los objetos también son dependientes de las partículas que los componen.

<sup>2</sup>Una buena síntesis de todos los problemas presentados se puede encontrar en MacBride 2016.

base a esta distinción, se podrían considerar las relaciones ideales como un mero producto de la mente o el lenguaje, y por tanto, no supondrían nuevos pobladores del mundo.

Por último, en cuanto a las relaciones equivalentes, es posible que quepa deshacer el entuerto apelando a la distinción entre expresión y estado de cosas. El hecho de que el gato esté en tales coordenadas, la alfombra en tales otras, y de esta situación resulte verdadero decir tanto «el gato está encima de la alfombra» como «la alfombra está debajo del gato» nos invita a pensar que están presentes estos dos elementos: un estado de cosas o hecho (las posiciones del gato y la alfombra) y dos expresiones lingüísticas que dan cuenta de ello. Por tanto, las que resultan equivalentes son las expresiones lingüísticas, las cuales no se han de confundir con el hecho en sí, que es donde reside propiamente la relación. Por lo tanto, cabe decir que por muchas posibles expresiones que tenga una relación real, el enunciarlas no aumenta de ninguna manera el número de entes que se da en el mundo.

### 7.1.3. Grados de dependencia en función de las relaciones

Tomando en consideración la idea de que no todas las relaciones suponen el mismo grado de unión entre sus componentes, se podría establecer una gradación de fuerza de las relaciones basada en la existencia o no de fundamentación entre sus relatos.

- Relaciones débiles o ideales: no existe ninguna dependencia real entre las partes.
- Relaciones intermedias o funcionales: existe una dependencia relativa a ciertas tareas u objetivos (que podría denominarse  $F_i$ ), como en los automóviles, herramientas, etc.
- Relaciones fuertes: existe una dependencia fuerte  $F$ , como en el mencionado caso de los sistemas biológicos.

De esta manera, se podría expresar, e incluso completar, la célebre distinción entre todos y agregados en términos de la axiomática de la fundamentación. Según algunas de las relaciones esenciales que definan el todo en cuestión sean débiles, funcionales, o fuertes, cabría hablar de todos débiles (meros agregados), o de todos funcionales y fuertes (que encajan mejor con la noción clásica de «todo»).

Se han añadido tres nociones nuevas, que junto a las ya conocidas, formarían el siguiente cuadro:

- Fundamentación entre partes:
  - Fundamentación fuerte:  $F$ . Definida por los axiomas AF1-AF5.
  - Fundamentación intermedia o funcional: existe entre las entidades que, sin comprometer necesariamente la posibilidad de su existencia separada, forman parte esencial o definitoria de un conjunto de procesos que llevan a cabo cierta tarea. Se puede expresar también diciendo que ambas entidades forman

parte de una dinámica. Simbólicamente puede expresarse así:  $F_i(a, b) =_{def} \exists x(P(a, x) \wedge P(b, x) \wedge Din(x))$ <sup>3</sup>

- Fundamentación todo-partes:
  - Fundamentación débil:  $WF$ . Definida por los axiomas WF1-WF3.
  - Fundamentación mereológica intermedia o funcional: se da en los todos en los que al menos dos partes esenciales están en una relación  $F_i$ . Es el tipo de dependencia que da lugar a todos funcionales. Simbólicamente:  $F_{mi}(a, b) =_{def} \exists xy(P(x, b) \wedge F_i(x, y))$
  - Fundamentación mereológica fuerte: es la que define los todos fuertes, en los que al menos una parte está fuertemente fundada en otra:  $F_{mf} =_{def} \exists xy(P(x, b) \wedge F(x, y))$

Los todos débiles o meros agregados serán entonces aquéllos en los que no existe ningún tipo de dependencia entre las partes, y por tanto, consisten únicamente en un nombre que designa ciertos objetos solamente enlazados por relaciones débiles.

En cuanto a las relaciones que existen entre los nuevos conceptos introducidos y la fundamentación débil y fuerte, puede establecerse lo siguiente:

Dada su generalidad,  $WF$  puede aplicarse a cualquier todo al que se apliquen  $F_{mi}$  o  $F_{mf}$ . Sin embargo, esto no sucede al contrario: no cualquier conjunto de partes constituye un todo fuerte o funcional, pero sí cualquier todo fuerte o funcional se funda débilmente en sus partes. Puede darse, además, un caso mixto, en el que se junten dependencias fuertes y funcionales. Por ejemplo, Bertalanffy proponía que en los sistemas abiertos también se formaban estructuras fijas que actuaban, al menos relativamente, de la misma forma que los sistemas cerrados. En este caso, los subsistemas del sistema (o «sub-todos» del todo) correspondientes a sistemas abiertos, serían caracterizados por la fundamentación mereológica fuerte; los cerrados, por la fundamentación mereológica funcional.

Tampoco tiene por qué cumplirse, en los todos fuertes y funcionales, la transitividad, puesto que no toda parte tiene por qué ser funcional o contribuir, *per se*, a la existencia de cualquier otra (pues puede que sólo contribuya a la existencia de otras partes cuando actúa en consonancia con otras entidades).

No se cumplirá, por razones similares, la propiedad expresada por WF3:

- Para todos funcionales se expresaría, en lenguaje natural, así: «si una entidad se fundamenta funcionalmente en otra, entonces todas las entidades en las que se fundamenta funcionalmente, serán parte de esa otra». No se cumple, puesto que las diversas entidades en las que se fundamenta el todo pueden conformar procesos diversos que, aunque coadyuven al mismo fin, supongan entidades diferentes y que por tanto no se encuentren en relaciones de partes.

---

<sup>3</sup>En la sección 8.2.1 se comentará con detalle el concepto de dinámica de un sistema.

- Para los todos fuertes: «si una entidad se fundamenta de forma mereológica fuerte en otra, entonces todas las entidades en las que se fundamenta de forma mereológica fuerte, serán parte de esa otra». En este caso tampoco se cumple, por las mismas razones. Por ejemplo, en un sistema abierto pueden confluír varios procesos que no son partes entre sí, y que presenten fundamentación fuerte entre ellos o con otras entidades del sistema.

En cuanto a  $F_i$ , se podría decir que sí comparte algunas de las propiedades con su homólogo  $F$ . En la fundamentación funcional tampoco se cumple la transitividad, pero es posible admitirla añadiendo algunas cláusulas como se hace en AF2-AF4. Un ejemplo de AF2 adaptado a  $F_i$ : si las ruedas dependen funcionalmente de los ejes, y los ejes del chasis, y las ruedas no son parte del chasis entonces las ruedas dependen funcionalmente del chasis.<sup>4</sup>

También queda excluida la relación de partes: es decir, que si  $F_i(a, b) \rightarrow \neg P(b, a)$ .

La propiedad expresada en el axioma AF5 de forma literal, expresaría lo siguiente: si hay una entidad  $a$  en la que otra  $b$  se fundamenta, entonces la primera será parte de la segunda, y además todas las entidades en las que se fundamenta la primera, serán partes de la segunda. Sirve, como se dijo con anterioridad, para expresar que dos entidades en fundamentación fuerte conforman un todo (de hecho, un todo fuerte, según la reciente denominación). No parece entonces haber problema en que esta idea sea aplicable a  $F_i$ , con la salvedad de que, además, ambas entidades forman parte de una dinámica (que es lo que distingue ambos tipos de fundamentación).

Por último, ha de señalarse que además de los casos mixtos antes expuestos, en los que un todo posee fundamentaciones funcionales y fuertes, se ha de contemplar el caso de la simultaneidad, en el que una entidad permite la existencia de otras, precisamente por formar parte de cierta dinámica. Es posible que, al pensar en la fundamentación, Husserl tuviera en mente casos como «no puede existir un acto intencional sin objeto», en las que la dependencia de la existencia viene dada por la estructura lógica de la conciencia, y no por algún proceso sistémico. Sin embargo, al pensar en sistemas biológicos, como en los ejemplos que se han propuesto sobre el cuerpo animal, es habitual que una entidad (tejido) dependa de otra fuertemente (oxígeno, nutrientes) a la vez que funcionalmente (proceso: circulación sanguínea). Por tanto, no han de resultar extraños los casos en los que, tanto  $F_{mi}$  como  $F_{mf}$  se apliquen a cierto todo, pero no por ello han de identificarse ambos conceptos ni existe necesidad de que siempre se den juntos.

## 7.2. Una mereología

Haciendo pie en la variante de la noción de fundamentación que se ha aceptado, se puede comenzar a proponer una mereología que resulte apta para la descripción ontológica

---

<sup>4</sup>Es decir, que las ruedas no dependen para existir del chasis, pero sí en su existir como ruedas, en tanto que permiten la consecución del movimiento del vehículo.

de los sistemas complejos. Es decir, se ha de buscar una mereología que permita tratar con las partes abstractas que se pueden definir a través del concepto F, junto con las precisiones y añadidos que se ha creído pertinente introducir.

### 7.2.1. Precisiones acerca de la extensionalidad y la mereología clásica

En el capítulo sobre mereología se trataron las ideas de Casati y Varzi. Estos autores afirmaban que si se añade el principio de suplementación fuerte a los axiomas de P presentados como un orden parcial, se tiene una mereología extensional. Sin embargo, como advierte Paul Hovda, es necesario realizar ciertas precisiones al respecto. (Hovda 2009)

En *What is classical mereology?* Hovda demuestra que lo que sucede en realidad es lo siguiente. En mereología se utilizan dos tipos de definición de la fusión (Hovda 2009, págs. 57-61), a través de los siguientes esquemas<sup>5</sup>:

- $Fu_1(t, \phi x)$ , que abrevia  $\forall y(O(y, t) \leftrightarrow \exists x(\phi(x) \wedge O(y, x)))$
- $Fu_2(t, \phi x)$ , que abrevia  $\forall x(\phi x \rightarrow P(x, t)) \wedge \forall y(P(y, t) \rightarrow \exists x(\phi x \wedge O(y, x)))$

Ambas expresan que  $t$  fusiona los  $\phi$ 's, de manera algo distinta. Varzi utiliza la primera.

Pues bien, en el sistema denominado M,  $Fu_1$  y  $Fu_2$  no son equivalentes, sino que  $Fu_2$  es más fuerte. Si se utilizan instancias de los esquemas de fusión se pueden tener axiomas de existencia de la fusión (Hovda 2009, págs. 62-5):

**Fusion1E** :  $\exists x \phi x \rightarrow \exists z Fu_1(z, \phi x)$

**Fusion2E** :  $\exists x \phi x \rightarrow \exists z Fu_2(z, \phi x)$

Hovda llama GM1 (*general mereology 1*) a la unión de M y Fu1E, y GM2 a la unión de M y Fu2E. Tanto GM1 como GM2 son débiles y presentan muchos casos problemáticos, que se pueden solucionar en parte prohibiendo que haya objetos con una sola parte propia a través de la suplementación débil (WS; ver sección 4.4). La unión de WS con

- M se denomina MM, como ya hacía Varzi
- GM1 se denomina WGM1 (*weak general mereology 1*)
- GM2 se denomina CLM (*classical mereology*)

Tanto MM como WGM1 son demasiado débiles y no permiten probar estos importantes teoremas de la mereología clásica:

- Producto:  $\forall xy(O(x, y) \rightarrow \exists z \forall w(P(w, z) \leftrightarrow (P(w, x) \wedge P(w, y))))$

<sup>5</sup>Se emplean esquemas para evitar utilizar lenguaje de segundo orden o teoría de conjuntos.

- BLUB (*binary least upper bound*):  $\forall xyw\exists z(P(z, w) \leftrightarrow (P(x, w) \wedge P(y, w)))$

Pero Varzi sostiene que GM1 es suficiente para probar el producto, y que SGM1 es equivalente a WGM1. Estas afirmaciones son erróneas. Lo que sí se puede afirmar es lo siguiente. La mereología clásica, CLM, equivale a:

- $M + Fu_1 + SS = SGM1$
- $M + Fu_2 + WS = WGM2$

Es decir, que si se usa la fusión de tipo 1, hay que usar la suplementación fuerte para obtener CLM, si se usa la fusión de tipo 2, hay que usar la suplementación débil. (Hovda 2009, pág. 70)

Por último, se ha de hacer notar que el cálculo de individuos tal cual lo presentan Leonard y Goodman sí equivale a CLM.

### 7.2.2. Una mereología con partes abstractas

Propiamente hablando, la mereología que se pretende ofrecer sí afirma que dos objetos con las mismas partes son idénticos, pero a diferencia de otras mereologías, utiliza un concepto de parte más amplio, puesto que admite las partes abstractas, de modo que ha de abandonar las partes exclusivamente extensionales. Esto obligará a hacer algunos cambios en la formulación axiomática estándar. La necesidad de estos cambios puede verse a través de los intentos de aplicación de los principios clásicos a un modelo que presente algunas de las características más comunes que se pretenderán captar al trabajar con sistemas complejos. Imagínese un todo  $T$ , compuesto de los objetos  $w, x, y, z$ , relacionados a través de  $p, q, r, s$  de la siguiente manera:

Es cierto de la relación  $p$  lo siguiente:  $F(p, x)$  y  $F(p, w)$ . Es decir, que la relación  $p$ , binaria, se funda en dos elementos,  $x$  y  $w$ . Se podría decir también que se funda en la suma de  $x$  y  $w$ :  $F(p, x + w)$ .

A su vez, se afirma con verdad que  $p$  es parte de  $w + x$  (pero no lo es de  $w$  ni de  $x$  por separado). De hecho,  $p$  es parte dependiente de  $w + x$ . Se empleará la definición D5 de Fine para describir la relación de parte dependiente, y la D4 para la independiente (ver sección 5.2).

Si se estudia la situación a la luz de los principios de suplementación, se verá lo siguiente:

- El enunciado simbolizado del principio de suplementación fuerte es:  $\forall xy(\neg Pxy \rightarrow \exists z(Pzx \wedge \neg Ozy))$
- Sustituyendo por las variables del ejemplo actual:  $\neg P(p, w + x) \rightarrow \exists z(P(z, p) \wedge \neg O(z, w + x))$ . Es decir, que si  $p$  no es parte de  $w + x$ , entonces tiene que haber un  $z$  que sea parte de  $p$  y no se solape con  $w + x$ .

- Sin embargo, si  $p$  no fuera parte de  $w + x$ , siendo una parte dependiente o abstracta, ¿cómo subsistiría? Desde luego, si no fuera parte de  $w + x$ , no quedaría nada de  $p$ , puesto que su existencia depende de ellos. De esta forma se ve que la suplementación fuerte no podría cumplirse en nuestra mereología.
- El enunciado de la suplementación débil es el siguiente:  $\forall xy(PP(x, y) \rightarrow \exists z(P(z, y) \wedge \neg O(z, x)))$ 
  - Sustituyendo:  $PP(p, w + x) \rightarrow \exists z(P(z, w + x) \wedge \neg O(z, p))$  Es decir, que si la relación  $p$  es parte propia del todo  $w + x$ , entonces hay algo que es parte de  $w + x$  y no se solapa con  $p$
  - Sería sencillo asumir que  $p$  es una parte propia de  $w + x$ , ya que es parte de este conjunto, pero no se podría identificar con la totalidad de él. Aceptado esto, también resultaría correcto el consecuente: hay una parte de  $w + x$  que no comparte partes con  $p$ , ya sea  $w$ ,  $x$ , algún fragmento de uno de ellos, etc.

Parece entonces que la suplementación débil se cumple para las partes dependientes, pero no la fuerte.

Si se añadiera a este sistema, compuesto de  $M + WS = MM$ , mereología mínima en el vocabulario de Hovda y Casati y Varzi, uno de los esquemas de fusión con su axioma de existencia, se tendría

- O bien CLM, añadiendo el esquema de tipo 2
- O bien WGM1, añadiendo el esquema de tipo 1

CLM no es deseable, pues en ella se puede probar como teorema la suplementación fuerte. La opción elegida ha de ser, por tanto, WGM1. Esta teoría no equivale a la mereología clásica, pues en ella no se pueden obtener el producto y BLUB como teoremas. Sin embargo, esto no resultará un problema para el propósito de esta tesis, para el cual es suficiente la fusión. No se tendrá, por tanto, una mereología extensional, pues el teorema de extensionalidad es derivable a partir de SS, como indicaba Varzi.

Se tendrá, finalmente, una teoría formada por la adición de AF1-5 (junto con los añadidos y precisiones presentados) y WGM1, en la cual, gracias a esta inclusión del concepto de fundamentación, se ha ampliado el significado del concepto de parte para poder tratar con partes abstractas (propiedades, relaciones, estructuras...) así como con partes concretas.

### 7.3. Una teoría de niveles

Aún falta una pieza básica de la teoría: una definición rigurosa de nivel. Sólo a partir de ésta se estará en condiciones de hablar del fenómeno de la emergencia, y por tanto de la autorregulación, la causación descendente, etc. con un menor nivel de ambigüedad. Para

tratar de expresar qué sea un nivel y cómo se comporta se emplearán todos los conceptos expuestos hasta ahora.

Se ha afirmado que los objetos se encuentran en distintos niveles de composición o complejidad. Es decir, que si  $x$  es parte de  $y$ ,  $x$  está en un nivel inferior a  $y$ . A estas alturas, esta afirmación requiere una precisión, y es que no resulta del todo correcto afirmar que siempre que  $x$  es parte de  $y$ ,  $x$  está en un nivel inferior a  $y$ . Por ejemplo, no se diría que la suma mereológica del papel y el lápiz está en un nivel superior al papel o el lápiz. El todo, para encontrarse en un nivel superior, debe poseer al menos una parte abstracta que dependa directamente de elementos del nivel inferior. Si no, sería simplemente un conglomerado de elementos dentro del mismo nivel. Es decir, que el café se encontraría en un nivel superior al de sus componentes químicos, puesto que sus propiedades, que son partes abstractas, (sabor, olor, color. . .) dependen de las relaciones entre estos compuestos químicos que lo conforman. Dicho de otra forma: son las emergencias las que marcan los cambios entre los niveles, como ya se ha adelantado antes.

Cabe entonces preguntarse qué tipo de entidad sea un nivel. Se ha de observar, antes que nada, que se trata de una suma de individuos. Esta suma está fundamentada en otras, a las que llamamos niveles inferiores, y fundamenta a su vez a otras, denominadas niveles superiores. Es condición necesaria, pero no suficiente, que los niveles inferiores contengan partes de los superiores. La otra condición que completa la definición es la que se acaba de señalar: al menos una de las partes abstractas de un nivel ha de depender de la organización de los objetos del nivel inferior.

Se tendrá entonces una cadena de niveles, fundamentados los unos en los otros. A este respecto, puede surgir la pregunta acerca de los niveles últimos y de los elementos últimos. Por supuesto, queda fuera del alcance de esta tesis una discusión acerca de las partículas fundamentales de la física. La respuesta, por tanto, tomará un cariz práctico y relativo al sistema a estudiar. Es decir, que cuando se afirme que los elementos últimos de un objeto ya no tienen partes, no tiene por qué tratarse de verdaderos «átomos», sino que tan sólo han de ser interpretados como tales según las circunstancias. Por ejemplo, si se está estudiando la posición que toman los pájaros en una bandada, se hará referencia a los cuerpos de los pájaros, a algunas de sus partes (ciertos mecanismos fisiológicos), etc., pero seguramente no entre dentro de la investigación estudiar las partículas elementales que componen a los animales, por resultar irrelevante. De esta manera, se postula que ciertas partes son los elementos últimos que poseen interés, clausurando así inferiormente los objetos de estudio. Sólo en el extremo y singular caso de tratar precisamente con las partículas elementales según cierta teoría física, se estaría en la situación de tratar con el único nivel que no posee partes abstractas fundadas en un nivel anterior, sino que todas las que posea se deberán a su propia organización. No resultará práctico entonces modificar toda la teoría de niveles por un caso particular, sino que quizá convenga más, llegado el momento, formular alguna definición *ad hoc*.

### 7.3.1. Una expresión simbólica de los niveles

Utilizando los conceptos ontológicos que han quedado codificados en los dos sistemas axiomáticos elegidos en las secciones anteriores (WGM1 + AF1-5) se intentarán expresar de manera rigurosa las propiedades que deberían tener los niveles. El vocabulario empleado será el siguiente:

- $N(x)_i = \langle x \text{ es un nivel en la altura u orden } i \rangle$ . Quiere decir que hay una entidad  $x$  que consiste en la fusión, según el esquema tipo 1, donde la condición es la siguiente: las partes propias de  $x$  pertenecen al nivel inmediatamente inferior ( $i - 1$ ). La definición tiene por tanto una forma recursiva.
  - Se puede establecer una numeración relativa entre los niveles, además de usando subíndices, así:  $N1, N2, N3 \dots, Nn$  siendo el de menor número el más bajo en la escala de composición.
  - De esta forma, si el nivel  $x$  es  $N1$ , y  $a$  está en ese nivel, se tienen varias opciones para expresarlo:
    - $x\pi N1$ . Esta segunda forma es más apta, entre otras cosas, para grupos grandes de elementos, los cuales pueden ser expresados como un conjunto, como en  $\langle (x, y, z, \dots)\pi N1 \rangle$  o mediante alguna condición:  $\langle (\text{los } \phi \text{ tal que } \dots)\pi N1 \rangle$
    - Existiría además una tercera forma, parecida a la primera y que emplea vocabulario mereológico. Dado que los elementos de un nivel son parte de éste, que es una fusión:  $\langle P(x, N(y)) \rangle$ , o bien  $\langle P(x, N1) \rangle$
  - Cuando se quiera expresar que determinada propiedad, relación, etc. se dice de elementos que están en el nivel  $x$  o  $Nn$ , se podrá expresar de una manera similar a la teoría de tipos:
    - $R(a, b)_1$  o  $R(a, b)_i$
    - $P(a)_1$  o  $P(a)_i$
- Para expresar la posición relativa de los niveles existen varias opciones:
  - $\langle N(x)_{i-1} \rangle$  quiere decir «el nivel  $x$  es inmediatamente inferior al nivel  $i$ » y por tanto,  $\langle N(x)_{i+1} \rangle$ , el superior
  - Si no se especifica el número de nivel se puede decir  $\langle N(x)_i \wedge N(y)_i \wedge i > j \rangle$ , o sea, «el nivel  $x$  está por encima del  $y$ ». Lo contrario se escribe, por tanto, así:  $\langle N(x)_i \wedge N(y)_i \wedge i < j \rangle$

Haciendo uso del vocabulario recién adquirido, se pueden representar de manera inequívoca los fenómenos que se han enunciado acerca de los niveles. La definición de nivel que se ha dado en lenguaje natural, tendría la siguiente forma:

- $N(x)_i =_{def} Fu(t, \phi x) | \phi =$ 
  - A)
    - $\forall x \exists yz ((PP(y, x)) \rightarrow y\pi N(z)_j \wedge j = i - 1$
    - $\exists vw ((F_{mi}(v, w) \vee F_{mf}(v, w)) \wedge v\pi N(x)_i \wedge w\pi N(z)_j$
  - B)  $\forall xy ((P(y, x) \rightarrow y = x) \rightarrow (x, y)\pi N(x)_i \wedge i = 1)$

Se ha de ver como una definición recursiva: si los  $x$  tienen alguna parte propia, entonces estas partes propias pertenecen al nivel inferior; si estas partes propias tienen a su vez otras partes propias, éstas pertenecen al nivel inferior al anterior, y así sucesivamente, hasta que se alcance el caso límite (si es que se da), en el que ninguna de las entidades de un nivel tiene partes propias, nivel que cabría denominar como «absolutamente primero».

La definición tiene dos partes, A y B. En la parte A se indica, por un lado, que si los  $x$  tienen alguna parte propia, ésta pertenece al nivel inferior. En la segunda cláusula de A se dice que en el nivel de los  $x$  tiene que haber al menos una entidad que se fundamente de forma mereológica fuerte o intermedia en al menos una entidad del nivel inferior. Esta restricción trata de captar la idea de que una mera fusión no sirve como nivel por sí sola, pues se podrían crear fusiones recursivamente de las mismas entidades, dando lugar a una «falsa profundidad», o bien se podrían extraer partes propias artificiosamente de una misma suma hasta el infinito. Por ejemplo, una pila de folios tiene como parte propia a la mitad de los folios, o a un solo folio. Sin embargo, considerar que el folio se encuentra en un nivel inferior a la pila resulta, desde el punto de vista de los sistemas complejos, ineficiente.<sup>6</sup>

Por su parte, la sección B de la definición indica el caso límite, en el que se tienen entidades que ya no poseen ninguna parte propia, y por tanto se encuentran en el último nivel. Estas entidades, por esto, ni siquiera podrían ser candidatas a cumplir la segunda cláusula de la parte A.

Cada nivel se funda débilmente en el inferior, ya que los elementos del nivel inferior son parte (propia) de él:  $WF(N(x)_i, N(x)_{i-1})$ .<sup>7</sup>

## 7.4. Conclusiones

A través de la versión de la mereología WGM1, ampliada mediante la axiomática de la fundamentación, se ha obtenido una teoría que permite tratar con una noción más amplia que la de la mereología clásica, y de esta forma tratar también como partes a aquellas que dependen de otras para existir, como las propiedades, relaciones, etc. Esta mereología no cumple con el principio de suplementación fuerte y define la fusión a través de lo que Hovda

<sup>6</sup>Si se deseara una definición de nivel puramente mereológica, basada de forma exclusiva en la noción de parte, bastaría con eliminar la segunda cláusula de la parte A.

<sup>7</sup>En la sección 8.3 se presentará un concepto de nivel menos rígido, pensado para el análisis de la ontología de sistemas.

ha denominado esquema de tipo 1, por lo que en ella, entre otras cosas, no es demostrable el producto como un teorema. Sin embargo, el esquema de fusión se ha mostrado suficiente para tratar con conglomerados de objetos que cumplan cierta condición.

$\forall xy(P(x, x))$
$\forall xyz(P(x, y) \wedge P(y, z) \rightarrow P(x, z))$
$\forall xy(P(x, y) \wedge P(y, x) \rightarrow x = y)$
Fusion1 = $Fu_1(t, \phi x)$ , que abrevia $\forall y(O(y, t) \leftrightarrow \exists x(\phi(x) \wedge O(y, x)))$
Fusion1E = $\exists x\phi x \rightarrow \exists zFu_1(z, \phi x)$
WS = $\forall xy(PP(x, y) \rightarrow \exists z(P(z, y) \wedge \neg O(z, x)))$

Cuadro 7.1: Resumen de los principios mínimos de la mereología elegida

Por último, esta mereología ampliada ha permitido definir el concepto de nivel y expresar algunas de sus características más reseñables. Esta noción se ha presentado como esencial a la hora de tratar con sistemas complejos y en general con la emergencia: siempre que se dice que aparece una estructura nueva, se dice que aparece a partir de algo, respecto de algo, pero además, lo nuevo que emerge ya no puede ser identificado con ese algo. Es en este caso donde tenemos un cambio de nivel (o de subnivel, según la escala con la que estemos tratando).

Una vez en posesión de estas herramientas teóricas se está en condiciones para analizar cada una de las características que exhiben los sistemas complejos, y así poder sacar a la luz sus fundamentos ontológicos, dando un paso más en el estudio de este tipo de sistemas.



## Parte III

# Estudio de la ontología de los sistemas complejos



## La ontología de las propiedades de la complejidad

Al final del capítulo segundo se esbozó, a la luz de lo estudiado en los diferentes autores que tratan la complejidad, un breve esquema que pretendía, más que clarificar, poner algo de orden a los distintos conceptos que se suelen asociar con los sistemas complejos. En este esquema se sugería que estas propiedades de los sistemas complejos estaban relacionadas entre sí de tal manera que, al menos en principio, parecían depender unas de otras. Es decir, parece que la multiplicidad es necesaria para la emergencia, y que el hecho de tener propiedades emergentes es lo que permite que se den fenómenos como la autorregulación, etcétera.

El presente capítulo se embarca en la tarea de ahondar más en esta idea. Si bien hasta ahora se han tratado las ideas de emergencia, autorregulación, no linealidad, etc. de una forma superficial, ha llegado el momento de emplear las nociones ontológicas sugeridas en los capítulos anteriores (todo, parte, nivel, dependencia...) con el objetivo de tratar de desentrañar los entresijos de los atributos de la complejidad. Es la tarea que corresponde a un estudio de la ontología de los sistemas complejos el cuestionar qué sea exactamente la emergencia (o la autorregulación, o la autopoiesis), si tiene sentido, si encaja con las teorías científicas desarrolladas hasta ahora, si entra en contradicción con otros conceptos de la complejidad, etc. Sólo así podrá componerse una imagen definida de los sistemas complejos que permita evaluar su utilidad, interés y relevancia como herramientas de investigación tanto científica como filosófica.

Antes de continuar, se precisan ciertas aclaraciones acerca de la manera de emplear el concepto de sistema. Hasta ahora se ha estado tratando «sistema» como sinónimo de conjunto de objetos y relaciones, de una manera informal. Sin embargo, a lo largo de las secciones de este capítulo, con especial énfasis en las últimas, se irá tratando de profundizar en este concepto, distinguiendo sus partes y propiedades. Es por esto por lo que es necesario llamar la atención sobre la naturaleza teórica de los sistemas.

Cuando se observa un fenómeno, se encontrarán en él una enorme cantidad de objetos, relaciones, procesos, etc. Sin embargo, a la hora de estudiarlo, no suele interesar la totalidad de partes que lo componen, sino sólo cierto conjunto de entidades destacadas. Por ejemplo, si se están tratando de estudiar las variaciones de población de un depredador y una presa, se tomarán en cuenta factores como el número de interacciones, la voracidad, la población en un momento dado, etc. No serán relevantes, aunque formen parte la porción de la realidad que se estudia, el pelaje de los animales, el número de patas que tengan, la altura de los árboles que les rodean, etc. Las entidades destacadas conforman el sistema a estudiar, y en este sentido el sistema es una construcción teórica. La totalidad de la porción de la realidad que engloba a este sistema, resulta algo inabarcable, tanto por la cantidad de partes que la componen, como por las diversas perspectivas que suscita (sobre todo en sistemas especialmente complicados).

Se ha de tener en cuenta este carácter teórico del sistema a la hora de comprender las descripciones matemáticas que se llevan a cabo de un sistema dinámico. En ellas simplemente se toman en cuenta un cierto número de variables relevantes, relacionadas mediante funciones. Asimismo, en un análisis ontológico de un sistema, tampoco se puede, ni se debe, tratar de tomar en consideración la totalidad de las partes que lo componen, sino sólo las entidades destacadas que intervienen de forma decisiva en los aspectos que se pretenden estudiar.

## **8.1. Emergencia**

Se afirma de manera habitual que una propiedad emergente es aquélla que posee el todo pero no las partes. Ésta parece ser la idea detrás de la célebre sentencia «el todo es mayor que la suma de las partes». Cabría añadir, para mayor precisión, que esta propiedad que el todo posee y las partes no, la posee precisamente en virtud de las partes: por la forma en que están dispuestas, por su actividad, etc. Sin embargo, pese a que en la mayoría de textos sobre sistemas complejos no se suele ir más allá de estas someras definiciones, se puede comprobar que resultan claramente insuficientes para caracterizar este fenómeno. Por ejemplo, si se tiene un pedazo de hierro de un kilogramo, se puede afirmar que este kilogramo es el fruto de la suma de mil partes de hierro de un gramo en una masa continua, ninguna de las cuales pesa un kilogramo. Este caso parece cumplir las condiciones de la definición que se acaba de dar. Ahora bien: ¿es esto la emergencia? O mejor dicho: ¿es esto un concepto interesante de emergencia?

### **8.1.1. Emergencia y superveniencia**

A lo largo del siglo XX, y con más énfasis en los últimos treinta o cuarenta años, muchos autores han tratado de responder a esta pregunta ofreciendo su propia definición de emergencia. Kim ofrece una definición de la emergencia basada en la idea de superveniencia

que parece captar, al menos, cierto sustrato común que puede observarse en los tratamientos habituales de la emergencia.

La superveniencia es definida de la siguiente manera: «La propiedad  $M$  superviene sobre, o es determinada por, las propiedades  $N_1, \dots, N_n$  en el sentido de que cualquier cosa que tenga  $N_1, \dots, N_n$ , tiene necesariamente  $M$ .» (traducido de Kim 2006b, pág. 550. Kim ofrece una definición similar en Kim 2006a, pág. 193) Esto parece querer decir, de forma muy general, que una propiedad o conjunto de propiedades es dependiente de otra propiedad o conjunto de propiedades. La idea de superveniencia parece encajar bien con el concepto de emergencia tal y como se ha venido tratando, pero resulta demasiado general a todas luces, y es que simplemente hace uso de los conceptos de dependencia o fundamentación y el de propiedad.

Kim afirma que la superveniencia es una condición necesaria para la emergencia, pero no suficiente. Para continuar con la caracterización de este fenómeno, se ha de dar un paso más en una dirección: la irreductibilidad. Se hace necesario entonces ofrecer una definición de reducción.

La reducción clásica, ejemplificada en los trabajos de Ernest Nagel, no es, en opinión de Kim, un modelo válido. Esto es así porque este tipo de reducción opera de la siguiente forma: se tiene un nivel base, un nivel superior y una suerte de «leyes puente» (*bridge laws*) que los conectan. (Kim 2006a, pág. 194) El problema es que esas «leyes puente»:

- Son meras correlaciones empíricas, de forma que no ofrecen una explicación de por qué el fenómeno  $X$  está conectado de forma regular con el fenómeno  $Y$ . Al final, estas mismas leyes necesitaría a su vez una explicación, lo que lleva al segundo problema.
- Son utilizadas como premisas de las derivaciones, en lugar de como conclusiones. Si de lo que se trata es de mostrar que por ciertas razones, dos niveles de fenómenos están conectados, no parece valioso comenzar el razonamiento asumiendo que están conectados.

El modelo de reducción que parece más útil en este sentido es el que presenta el funcionalismo. En este tipo de reducción se conecta lo semántico o conceptual, por ejemplo, «dolor», con los «realizadores» de este concepto, en este caso, ciertas propiedades físicas y conductuales. Así, una vez que se ha llevado a cabo el trabajo conceptual de aclarar el sentido de cierto término, se ha de efectuar la investigación empírica que descubra cuáles son las bases sobre las que se sustenta el fenómeno designado por ese término, sin necesidad de leyes puente de ningún tipo. Lo siguiente es un ejemplo de reducción funcional propuesto por Kim (Kim 2006a, pág. 196):

1. El sistema  $s$  está en el estado neural  $N_1$  en  $t$
2.  $N_1$  es un estado neural tal que el daño del tejido en  $s$  y sistemas como  $s$  causa que entren en el estado  $N_1$ , y  $N_1$  causa que esos sistemas adopten una conducta aversiva

3. Por definición, un sistema siente dolor si y sólo si está en algún estado  $P$  tal que  $P$  es causado por daño del tejido y  $P$  causa comportamiento aversivo
4. Entonces,  $s$  siente dolor en  $t$

Si un fenómeno, en este caso el dolor, es funcionalmente reducido, se garantizan varias cosas. En primer lugar, las ocurrencias de dolor pueden ser predichas, puesto que se identifica el estado neural y conductual a los que necesariamente sigue el dolor. Además, se puede explicar por qué un organismo tiene dolor sobre la base de fenómenos neurales y conductuales. Por último, cada ocurrencia del dolor tiene los poderes causales de su realizador neural. En última instancia, se podría identificar el dolor con sus realizadores neurales.

La irreductibilidad quedaría entonces definida como la negación de la reducción funcional. Es en este sentido en el que la emergencia sería irreductible. La definición de emergencia queda precisada entonces por Kim de la siguiente manera: una propiedad emergente es superveniente, es decir, dependiente de una base que la «realiza», pero a su vez no es reducible funcionalmente a esta base.

Sin embargo, aún queda al menos otro concepto que suele asociarse a la emergencia, y es el de causación descendente. Si se admite que una propiedad emergente no es reducible y a la vez no es un mero epifenómeno, entonces se suele aceptar que dicha propiedad tiene eficacia causal, es decir, la capacidad de provocar cambios en otros entes. Esta noción resulta problemática en muchos aspectos y merece un análisis más profundo. Suele pensarse, como el propio Kim indica (Kim 2006b, pág. 548), que la causación descendente está indisolublemente unida a la emergencia, y, a la vez, es la causa de la perdición de ésta.

### **8.1.2. La causación descendente**

Parece existir cierto consenso a la hora de definir el concepto de causalidad en torno a las leyes de conservación. En física se consideran conservadas en un sistema la masa-energía, la carga y los momentos angular y lineal. (Vicente 2001, págs. 6-7) Se entiende entonces la causalidad como una relación entre propiedades conservadas: «Magnitudes como la velocidad no pueden ser transferidas, o intercambiadas, porque no se conservan. En un choque “clásico” (i.e., elástico, inelástico o plástico) el momento incidente es igual al saliente, y cabe decir de este modo que el objeto incidente transfiere su momento al saliente, o que ambos intercambian sus momentos. Pero nada semejante se puede decir acerca de la velocidad: la velocidad entrante puede desaparecer en gran parte. [...] Para contar como proceso causal, el objeto ha de poseer alguna propiedad transferible, o intercambiable, y esto quiere decir alguna propiedad conservada.» (Vicente 2001, pág. 10)

La causalidad puede ser entendida como el intercambio o transferencia de cantidades conservadas. Un epifenómeno se podría definir, según lo dicho, como un fenómeno que no instancia cantidades conservadas. Por ejemplo, una sombra en movimiento proyectada en

una pared resulta ser un fenómeno físico, pero que carece de poder causal, pues sólo posee velocidad, una cantidad que no se conserva.

Siguiendo el concepto de causalidad propuesto, la causalidad descendente ha de entenderse, entonces, como la transferencia de una cantidad conservada de un nivel superior a uno inferior. Es esto lo que parece afirmarse cuando se dice que los patrones globales de comportamiento influyen en la conducta de los agentes individuales, cuando se dice que la mente actúa sobre el cerebro, cuando se dice que el entorno influye sobre los genes<sup>1</sup>, etc. En definitiva, cada vez que se afirma que el todo influye causalmente sobre alguna de las partes que lo componen. Sin embargo, el concepto mismo de causalidad descendente, o al menos esta forma habitual de entenderlo, puede resultar problemático, entre otras cosas, respecto de lo que se conoce como «principio del cierre causal» o «principio del cierre causal del mundo físico».

El principio del cierre causal, el cual se infiere a partir de las leyes de conservación (Vicente 2001, pág. 5), se puede enunciar como sigue: «[el principio del cierre causal] afirma [...] que si un evento físico tiene una causa, ésta es física. Que la causa es completa quiere decir que engloba también a lo que suelen denominarse “factores causales”. En definitiva, el principio del cierre sostiene que ninguno de los factores causales involucrados en la producción de un efecto físico es no físico.» (Vicente 2001, pág. 4)

Por ejemplo, cuando se afirma que los pensamientos tienen efectos en el mundo físico, según este principio, parece que no queda otra que aceptar que los pensamientos son procesos físicos. De otra forma, se tendría que aceptar que un proceso no físico tiene efectos sobre un proceso físico, violándose las leyes de conservación: un pensamiento podría introducir o quitar parte de la energía de un sistema, por ejemplo, una taza de café, haciendo que dicha taza se enfriara o se calentara, dando lugar a una suerte de *telekinesis*, y a la vez, dando al traste con la conservación de la energía.

El problema que surge y que será tratado en secciones siguientes es el siguiente: si lo que emerge de lo físico no es reducible, por principio, a lo físico, y a su vez tiene poderes causales sobre el nivel inferior del que emerge, entonces se podría entender que algo no físico tiene influencia causal sobre lo físico, violándose así el principio del cierre causal. (Kim 2006a, págs. 199-200)

### 8.1.3. La polisemia de la emergencia

Dada la disparidad de fenómenos a los que se aplica el término de emergencia, es posible que resulte útil realizar ciertas distinciones de grados o tipos de emergencia. Tratar la emergencia como si fuera un concepto de un único significado puede que sea, al menos en parte, una de las semillas de donde germinan varios de los problemas que este concepto acarrea. Por ejemplo, las propiedades de un triángulo son emergentes respecto de las rectas

---

<sup>1</sup>Es célebre el ejemplo propuesto por Campbell acerca de la causación descendente que la selección natural ha provocado sobre la forma de la mandíbula de ciertas termitas en «La causación descendente en los sistemas biológicos jerárquicamente organizados», en Ayala y Dobzhansky 1983, págs. 236-245

que lo componen: dependen de la disposición de esas rectas, pero a la vez, no pueden ser reducidas a ellas en solitario. Sin embargo, esta emergencia resulta muy diferente de la que ofrecen las capacidades intelectuales respecto del cerebro. Para empezar, no sólo el cerebro está compuesto de múltiples sistemas anidados, sino que sus componentes interactúan dinámicamente, y no se limitan a formar una estructura inmóvil, como en el caso del triángulo. Además, al menos en la concepción más común, las propiedades mentales tienen la capacidad de modificar la conducta del sujeto, no siendo meros epifenómenos. Es posible que entre estos dos casos extremos, existan varios grados intermedios cuya identificación ayude en la definición y comprensión de la emergencia.

A este respecto se puede tomar como ejemplo la sugerencia de Terrence Deacon y sus tres clases de emergencia (Deacon 2006, pág. 126):

- De primer orden o termodinámica
- De segundo orden o morfodinámica
- De tercer orden o teleodinámica

La emergencia de primer orden se refiere a los fenómenos termodinámicos de nivel superior. De estos afirma Deacon que son reducibles pero no son simétricos entre niveles de descripción, es decir, no son aplicables a partículas aisladas. Al tratarse simplemente de un caso de dependencia, pero en el que no hay irreducibilidad, es identificado con la superveniencia. Las nuevas propiedades parecen provenir de la forma en que se relacionan las partes, pero no existe la causación descendente. Este tipo de causación no se da, al menos, en el sentido expuesto más arriba, pero existen ciertos casos en los que la propia forma de relacionarse las partes cancela ciertas propiedades de las partículas aisladas, permaneciendo sólo algunas. Es decir, la forma provoca constricciones. Se trata de los cambios de fase. Sin embargo, son más bien la excepción que confirma la regla. (Deacon 2006, págs. 126-130)

La emergencia de segundo orden es la que se observa en sistemas autoorganizados. Deacon ofrece varios ejemplos: células de Bénard, formación de cristales de nieve, láseres y reacciones autocatalíticas. Lo que tiene en común este tipo de sistemas es que ciertos comportamientos del nivel inferior son o bien aumentados o bien constreñidos sucesivamente por las estructuras que aparecen en el nivel superior, dando lugar, en sucesivas iteraciones, a estructuras cada vez más complejas que tienden a mantenerse en el tiempo. (Deacon 2006, págs. 130-137) Esto puede observarse de forma sencilla en el ejemplo de la formación de un copo de nieve:

The structure of an individual snow crystal reflects the interaction of three factors: (1) the hexagonal micro-structural biases of ice crystal lattice growth, inherited from water molecule symmetry, (2) the radial symmetry of heat dissipation, and (3) the unique history of changing temperature, pressure, and humidity regimes as a developing crystal falls through the air.

Snow crystal growth occurs across time in diverse regions in a variable atmosphere, the history of temperature and humidity differences it encounters is captured and expressed in the variants of crystal structure at successive diameters. In this way, the crystal is effectively a record of the conditions of its development. But snow crystals are more than merely a historical record of these conditions because of a «compound interest» effect in which prior stages of crystal growth progressively constrain subsequent stages. (Deacon 2006, págs. 132-133)

Es decir, que la estructura que emerge en cada momento influye en el comportamiento de las estructuras futuras limitando (o en otros casos amplificando) la acción de las fuerzas que operan en los niveles inferiores. Este fenómeno no parece reducible al comportamiento de las partes en tanto que condiciones idénticas pueden producir patrones diferentes en función de las estructuras que aparezcan al inicio de la historia del copo de nieve.

En cuanto a la teleodinámica, o emergencia de tercer orden, se podría decir que es la que aparece junto con fenómenos relacionados con la información o la memoria, y es que de esta manera, un evento puede modificar repetidamente el resto de la historia del sistema. La memoria es lo que diferencia los sistemas caóticos de los ordenados, y es algo que no se da en la emergencia de segundo orden. En la emergencia de tercer orden existe una amplificación recursiva de relaciones morfodinámicas complementarias, es decir, que el sistema tiende a un patrón estable que es recíprocamente reforzado por otro. (Deacon 2006, pág. 137)

Deacon considera que esta emergencia es la base de la memoria y la evolución. De hecho, se aventura a dar una definición de la selección natural utilizando su lenguaje sobre la emergencia: «We might thus describe natural selection as a stochastic “exploration” of variant morphodynamic relationships of reciprocity with respect to environmental regularities. For such exploration to take place, morphodynamic processes must be reliably reproducible.» (Deacon 2006, pág. 138) Se exploran las relaciones morfodinámicas que de alguna forma encajan con el entorno. Para que los cambios adaptativos permanezcan, deben ser reproducibles: aparece el efecto de la memoria.

Como ejemplo de emergencia de tercer orden Deacon propone un sistema molecular denominado «autocélula». (Deacon 2006, págs. 141-143) En este sistema se combinan dos mecanismos de segundo orden: la autocatálisis y el auto-ensamblaje (*self-assembly*). En la autocatálisis, el propio producto de una reacción química es uno de los elementos necesarios para que se inicie la reacción, dando lugar a un proceso en cadena. El auto-ensamblaje es un tipo de cristalización en el que moléculas duplicadas tienden a congregarse en agregados mayores con formas geométricas específicas. De las interacciones de estos procesos relativamente más simples, emergen características de tercer orden como la auto-reparación e incluso auto-reproducción.

Cada una de estas emergencias constituye un nivel que depende del anterior, pero no se trata de niveles simplemente composicionales, sino categoriales. Se entiende «nivel

composicional» tal y como se ha esbozado al final del capítulo sobre la ontología de niveles: si  $X$  es parte de  $Y$ , entonces  $X$  está en un nivel inferior a  $Y$ . Un nivel categorial, por su parte, describe un «tipo» de nivel, es decir, que designa un grupo de niveles que tienen ciertas características comunes. Esto es, supongamos que dentro de un sistema se dan emergencias primarias y secundarias. Las secundarias dependen del hecho de que se den las primarias, pero a su vez, dentro de las primarias, puede haber distintos niveles de composición: en un sistema termodinámico se tiene, al menos, el nivel de las partículas y el del recipiente y el comportamiento global de dichas partículas. Este tipo de sistemas, a su vez, puede servir de base para sustentar una nueva morfología, compuesta también de varios niveles de partes.

No se trata, por supuesto, de tomar esta división en grados de emergencia como algo definitivo e inamovible, sino más bien como un punto de partida. En primer lugar, se trata de una división bastante clara y ejemplificada en varios casos empíricos. No resulta caprichosa o arbitraria y puede facilitar la tarea de delimitar fenómenos.

Además, debido a su carácter categorial, facilita el estudio de los sistemas y hace que gane en precisión. Esto es debido a que de entrada, puede que no resulte útil ni práctico simplemente descomponer un sistema en partes y partes de partes, etc. de cara a comprender su funcionamiento. Sin embargo, si se divide en partes como autocatálisis, auto-reproducción, metabolismo, memoria... habiendo categorizado, tras su estudio, estos procesos dentro del tipo de emergencia que les corresponde, se podría elaborar un «mapa general» de la ontología de dicho sistema, en el cual se expresarían las relaciones de dependencia entre los procesos superiores e inferiores. Después de este análisis resultará entonces factible identificar las partes composicionales de cada proceso, completando así la jerarquía mereológica.

Respecto de otros niveles que suelen emplearse a menudo, tales como «nivel físico», «nivel biológico», «nivel mental», etc. esta división en grados gana en precisión. Si se quiere comprender la ontología específica de un sistema para describir cuál es la estructura de las relaciones entre sus partes, no puede simplemente comenzarse diciendo que « $X$  es el nivel mental». Definir una serie de mecanismos mentales habría de ser en este sentido, más bien, un punto de partida.

Pese a esto, cabría hacer aún algunas precisiones en torno a esta clasificación, en concreto, respecto del tiempo. Y ello en dos sentidos. En primer lugar, puede notarse que esta división de tipos de emergencia está claramente orientada al estudio de sistemas dinámicos, es decir, sistemas cuyas partes se mueven y cuyas relaciones cambian con el tiempo. Esto saca fuera del dibujo posibles ejemplos de emergencia como el del triángulo mencionado al inicio de la sección, es decir, sistemas estáticos o conceptuales. Este cuarto tipo de emergencia, que cabría denominar «estática-conceptual», puede ayudar a delimitar del todo los casos que no habrían de ser tenidos en cuenta a la hora de tratar con la emergencia en los sistemas complejos y en todo sistema dinámico en general, y a su vez, a tratar de distinguir todos los sentidos posibles del término emergencia, dentro de lo posible.

En segundo lugar, se ha de hacer notar la diferencia entre la génesis o aparición de un sistema, y su funcionamiento. En otro lugar (Deacon y col. 2003, págs. 273-308) Deacon trata la misma distinción de niveles de emergencia pero además hace hincapié, entre otras cosas, en la distinción entre diacrónico y sincrónico. Pese a que resulte en cierto sentido adecuado afirmar que la actividad mental emerge del cerebro y que una llama emerge de la interacción de reacciones químicas, entre ambos tipos de fenómenos existe una diferencia fundamental: la historia. En palabras de Deacon:

- Sincronismo: «Synchronic uses of the concept of emergence are usually restricted to properties of matter that become evident with ascent in scale. Consider water: H<sub>2</sub>O molecules in large aggregates in the right conditions exhibit a set of dynamical properties we refer to as liquidity. These higher-order properties depend only on the specific properties of the constituent molecules, determining what might be called parameters of liquidity (e.g., viscosity, vaporization point, etc.)» (Deacon y col. 2003, pág. 277)
- Diacronismo: «Evolution is a historical phenomenon in ways that liquidity isn't. I would even want to say that evolution is, in some sense, "more" emergent than liquidity. Evolution involves time in a convoluted way. It is not self-similar in any simple way. A raindrop analyzed two hundred million years ago and another analyzed five minutes ago would be vastly more similar than two individual vertebrates even from the same lineage. There is self-similarity to life across time but there is also a similar trend of difference.» (Deacon y col. 2003, pág. 278)

La liquidez del conjunto de moléculas de agua bajo ciertas condiciones no es el fruto de una larga historia causal, sino una propiedad sistémica que puede aparecer en muchos otros materiales dadas otras condiciones. Es una propiedad emergente en el sentido de que es superveniente respecto del nivel molecular y, además, resulta novedosa en cierta manera por ser relacional y provenir de la sinergia de cierta cantidad de factores.

Por otro lado, la emergencia o aparición del cerebro humano, comparada con las ancestrales aglomeraciones de neuronas de ciertos animales marinos que poblaban la tierra hace millones de años, no se puede explicar simplemente como la interacción más o menos compleja de muchos elementos del micro-nivel, sino como la historia de la aparición de diversas estructuras, cada una de las cuales supone, en cierto sentido, el punto de partida de la anterior. Es más, en la aparición de cada una de estas estructuras, están involucrados gran cantidad de procesos moleculares similares a la aparición de la liquidez en el agua; es decir, que los procesos diacrónicos utilizan como base los procesos sincrónicos.

Estas ideas pueden enriquecer la división en grados de la emergencia. Para la emergencia de primer y segundo grado no es demasiado relevante la perspectiva temporal en el sentido de recorrido histórico: tanto un sistema termodinámico como un copo de nieve o un láser dan lugar a estructuras y propiedades continuamente repetibles bajo ciertas condiciones. En cambio, la emergencia del lenguaje o de las capacidades mentales, emergencias de tercer

orden, suponen un salto cualitativo no sólo por el mero hecho del largo recorrido histórico, sino por nacer de la selección y combinación de procesos de los dos grados inferiores. Esto no quita, sin embargo, que se puedan estudiar, por ejemplo, funciones superiores como la memoria interpretándolas como emergentes respecto de la actividad de ciertas zonas cerebrales. Parece querer decir<sup>2</sup>, más bien, que en las emergencias de tercer orden existen dos perspectivas temporales que resultan relevantes para el estudio del sistema, y que denotan dos sentidos de emergencia que pueden ser diferenciados.

De esta forma, se puede perfilar aún más el concepto de emergencia, añadiendo una característica a la emergencia de tercer orden que permite distinguirlo mejor de las dos anteriores. Esto supondrá, pues, una ayuda a la hora de ofrecer una definición formal de la ontología de los sistemas complejos.

#### **8.1.4. Los principales problemas de la emergencia y propuestas para su solución**

El concepto de emergencia, pese a que se distinguen en él varias acepciones, presenta muchos problemas que amenazan seriamente su aceptación. Algunos se han planteado ya a lo largo de las secciones anteriores secciones de este capítulo, y otros simplemente se han insinuado. En lo que sigue, se tratará de exponer con más detalle las más importantes de estas dificultades, y a continuación, una propuesta de solución que se adoptará en esta tesis.

#### **El problema del cierre causal y la causación descendente**

##### **Enunciación del problema:**

Algunos autores como Kim opinan que la causación descendente se halla indisolublemente unida al emergentismo: «There is no question that emergentists should want downward causation. Emergent properties must do some serious causal work, and this includes their capacity for projecting causal influence downward, affecting the course of events at a purely physicochemical level. Causally impotent properties are explanatorily useless, and there would be little point in positing them or acknowledging their existence in scientific theory.» (Kim 2006a, pág. 198) Si bien en algunos casos de emergencia, como la de primer orden, no parece que haya causación descendente de ningún tipo, en otros, como la evolución, la idea sigue estando presente. Se puede seguir aceptando, entonces, que la causación descendente pone en riesgo, al menos, una parte importante de la emergencia.

---

<sup>2</sup>Esta interpretación del sincronismo y el diacronismo se debe más bien al autor de la tesis. Deacon la utiliza más para resaltar la diferencia entre la emergencia simple o de primer orden, y las de segundo y tercero, siendo estas últimas en las que más importancia tiene el recorrido histórico. Para él, la interpretación sincrónica de algo como la vida, simplemente deja de lado demasiados aspectos importantes.

El problema que supone este tipo de causación puede quedar bien expresado en lo que se ha conocido como «argumento de la exclusión»<sup>3</sup>:

1. Pr. Fisicalismo de casos: todo caso de evento mental es idéntico a algún caso de evento físico
2. Pr. Los poderes causales de un caso de evento mental están completamente determinados por sus propiedades físicas
3. Pr. La no reducibilidad de lo mental: las propiedades mentales no son ni idénticas con las físicas ni reducibles a ellas
4. C. Las propiedades mentales de un caso de evento mental ni siquiera determinan parcialmente sus poderes causales (por 1,2,3)
5. C. Las propiedades mentales no son causalmente potentes (por 4)
6. C. Las propiedades mentales no son causalmente relevantes; son epifenoménicas (por 5)

Este sería el argumento que emplearía alguien tendente al fisicalismo y que, a la vez, trataría de encajar la idea de emergencia (en este caso de lo mental) con su visión del mundo. En esta simplificación, el argumento contiene básicamente dos ideas: que todos los eventos son físicos y que el mundo de lo físico constituye un sistema causal cerrado. Esto le lleva a concluir, al tomar como premisa que lo mental ni es idéntico con lo físico ni reducible a ello, que las propiedades mentales son epifenoménicas, es decir, sin eficacia causal. Esto sería aplicable a cualquier caso de emergencia no reducible.

Si se quisiera aceptar la emergencia se habría de negar que todos los eventos son físicos y negar el cierre causal, pues parece difícil negar que todos los eventos sean físicos, es decir, aceptar eventos no físicos, y mantener el cierre causal, a no ser que se apoye un dualismo, o pluralismo, no interaccionista (pues en el momento en el que hubiera interacción, se violarían las leyes físicas de conservación). Y si se negara el cierre causal, se aceptara o no que todo evento es físico, se tendría un grave problema: habría que rechazar toda la física contemporánea.

Vistas así las cosas, la pregunta es la siguiente: ¿no hay una forma de salvar el cierre causal, aceptar que todo evento es físico y a la vez aceptar una emergencia no reducible y con causación descendente?<sup>4</sup>

<sup>3</sup>Basado en la exposición de Van Gulick en Gulick 1993, 236, 242 y ss. Las premisas están marcadas con la abreviatura «Pr.» y las conclusiones con «C.»

<sup>4</sup>Cabe aclarar de que no se trata de salvar la emergencia a toda costa porque sea una idea que «guste». Más bien, se trata de explorar una posibilidad plausible a través de un concepto que puede presentarse útil a la hora de estudiar ciertos fenómenos (como los ejemplos de sistemas complejos que ya se han visto y otros que se estudiarán más a fondo en el siguiente capítulo). Si el concepto de emergencia no fuera conciliable de manera alguna con la ciencia actual, debería entonces o bien rechazarse, o, a lo sumo, tomarse como una metáfora útil (esperar una revolución científica que cambie por completo el panorama y en el que la emergencia fuerte encaje a la perfección suena algo descabellado).

**Posible solución:**

Una de las soluciones más plausibles a este problema, y que presentan de manera bastante similar autores como Van Gulick (Gulick 1993, págs. 233-256)<sup>5</sup>, Juarrero (Juarrero 2013), Emmeche y El-Hani (El-Hani y Emmeche 2000) o Murphy (Murphy 2006, págs. 227-243) tiene como cimiento la siguiente idea: ampliar la noción de causa.

La noción de causa definida anteriormente como transferencia de cantidades conservadas es, salvando las distancias, algo así como la «versión moderna» de la causalidad eficiente, en términos aristotélicos. Según ésta, una cosa provoca un cambio en otra. Es lo que sucede cuando una bola de billar choca con otra, cuando un fuego calienta un cazo, cuando una piedra provoca ondas en el agua, etc. Pensada en estos términos, la causación descendente resulta problemática, como se ha visto, respecto de las leyes físicas. Sin embargo, puede haber otras formas de ejercer influencia. Y es que las propiedades de los compuestos no las determinan sólo las leyes físicas, sino también la organización de estos mismos compuestos:

The events and objects picked out by the special sciences are admittedly composites of physical constituents. But the causal powers of such an object are not determined solely by the physical properties of its constituents and the laws of physics, but also by the organization of those constituents within the composite. And it is just such patterns of organization that are picked out by the predicates of the special sciences. (Van Gulick en Gulick 1993, pág. 250)

Los componentes de un sistema se hallan relacionados formando patrones, y son estas relaciones las que se suman a las leyes físicas pertinentes y definen el comportamiento global del sistema. Contra esto, un fiscalista podría argumentar que lo que es causalmente relevante son las instancias de esos patrones de orden superior las que resultan causalmente relevantes, y éstas han de ser enteramente físicas. Van Gulick propone la siguiente respuesta con varios contraejemplos (Gulick 1993, págs. 251-252), orientados a mostrar que lo emergente es al menos parcialmente independiente de sus componentes base:

- Los patrones son características estables y recurrentes del mundo
- Muchos de estos patrones se conservan pese a que los constituyentes desaparecen (al menos parcialmente)
- También, muchos de ellos se conservan pese a las perturbaciones por parte de fuerzas físicas (por tanto, no parece tener sentido que sean reducibles a éstas)
- Los poderes causales de los constituyentes físicos se seleccionan, no están todos activos a la vez
- Esta selección de poderes causales contribuye a la conservación del patrón

---

<sup>5</sup>Obra perteneciente a Heil y Mele 1993.

Los dos últimos puntos resultan esenciales: los poderes causales de los constituyentes, es decir, la aplicación de las leyes físicas correspondientes sobre las partes del todo, son seleccionados, y a su vez, esta selección contribuye a que el patrón permanezca. Esto quiere decir, simplemente, que los patrones emergentes actúan de condiciones de frontera.

Lo que hacen las condiciones de frontera es, en definitiva, modificar (limitando o ampliando) el espacio de estados posibles del sistema. No aparece una nueva sustancia, sino una nueva distribución de probabilidades:

The coherent integration characteristic of organisms is thus due to the closure of first order context-sensitive constraints and the establishment of these long-range correlations. There is no need to imagine a different substance emerging; nor is there any need to postulate an external agency that shapes the boundary condition patterning that resculpts the state or phase space, the terrain. The emergent coherent organism [...] is the altered probability distribution, in an expanded phase space –the renewed dynamic potential– of the lower level component operations. The emergent patterns and shapings [...] are the causally effective, if not efficiently causal, renewed probability distribution of those components. A new probability distribution of a relational pattern is what defines or constitutes higher levels of organization, and it is the new probability distribution that is endogenously fixed or shaped by the dynamical closure of first order context sensitive constraints. (Juarrero 2013, pág. 10)

Si los patrones emergentes simplemente modifican las posibilidades de distribución de los componentes del sistema, no parece que se violen las leyes de conservación, puesto que se trata de un tipo de causalidad distinta no basada en la transmisión de cantidades conservadas. Se puede entonces seguir aceptando el cierre causal, así como la idea de que todos los eventos son físicos, puesto que un nuevo nivel no supone un nuevo tipo radical de entidad, sino a lo sumo, una nueva estructura, dinámica o comportamiento con la capacidad de producir constricciones sobre las leyes fundamentales, pero no de violarlas. El único añadido que habría de hacerse es el siguiente: la descripción física completa de los eventos del mundo debe incluir las especificaciones de las condiciones de frontera y de las condiciones iniciales, pues si son elementos causalmente relevantes han de intervenir en la explicación de la historia de formación de los sistemas, así como de su funcionamiento.

Debido a que estas condiciones de frontera son impuestas por la propia forma del sistema, algunos autores abogan por rescatar el concepto de causa formal aristotélica, pero reformulado. (El-Hani y Emmeche 2000, pág. 261) La relación entre la causa eficiente y la formal sería la siguiente: la causa formal selecciona en  $t - 1$  las interacciones que podrán tener lugar debido a la causa eficiente en  $t$ .

El siguiente ejemplo puede arrojar luz sobre la idea:

Consider, for instance, a test tube containing  $n$  molecules. Those  $n$  molecules, in their Brownian movement, can enter into infinitely many possible relations. Consider, then, a second test tube containing cells formed by those same  $n$  molecules. Within those cells, the molecules cannot enter into the total set of relations observed in the first test tube. The set of possible relations among them is constrained when they become part of a cell, as the cell causes the molecules to have a much more ordered distribution in spacetime than they would have in its absence. Such a constraint on the molecules' relations results from their being part of the spacetime form, or pattern, of cellular structures and processes (*formal causality*). (El-Hani y Emmeche 2000, pág. 262)

El hecho de encontrarse unidas formando una célula, en lugar de rebotar caóticamente por las paredes del tubo de ensayo, ha reducido drásticamente las distribuciones posibles de las moléculas en el espacio y el tiempo. No se han violado las leyes de movimiento, simplemente ahora se aplican a una estructura más compleja, que posee otras propiedades o, por decirlo así, las propiedades mermadas de sus componentes.

La clave es reconocer, por tanto, que no sólo los estados microfísicos son eficazmente causales, sino que también lo son sus compuestos, precisamente en virtud de que son compuestos suyos y mantienen ciertas propiedades que son seleccionadas. Por tanto, es necesario aclarar la naturaleza de estos compuestos de nivel superior a través de una elucidación de la emergencia y la causación descendente. Sólo así podría aceptarse la inclusión de este «nuevo»<sup>6</sup> tipo de causalidad, llámese descendente, formal o condiciones de frontera.

En definitiva, esta propuesta de solución a algunos de los problemas de la emergencia pasa por volver a la intuición de Polanyi: las condiciones de frontera. De esta intuición se ha eliminado la necesidad de una agencia externa que imponga dichas condiciones (Juarrero 2013, pág. 7), pero la esencia es la misma: la modificación del espacio de estados por parte de las estructuras de un nivel superior. La idea cobra pleno sentido como alternativa o complemento al reduccionismo, que tiene el peso de los éxitos a su espalda, pero que también plantea algunos problemas a la hora de tratar con ciertos aspectos de los fenómenos del mundo. El emergentismo tiene aún muchos conceptos que desarrollar, pero parece dar sentido a varias características del comportamiento no lineal de los sistemas.

### **El problema de la definición positiva de la emergencia**

#### **Enunciación del problema:**

Una de las principales objeciones que opone Kim a la idea de emergencia, y que suele recalcar, es la de la falta de una definición positiva. La definición que se ha ofrecido anteriormente, y que trataba de aunar las intuiciones básicas acerca de la emergencia,

---

<sup>6</sup>No parece ser estrictamente necesario modificar o ampliar el concepto de causa tal y como se emplea en física, sino simplemente tener en cuenta la capacidad de influencia de las propiedades relacionales respecto de la historia de un sistema.

constaba de dos elementos: la superveniencia y la irreducibilidad. La superveniencia sí ha sido definida de manera positiva, y no es más que la idea de dependencia aplicada a las propiedades y los niveles; sin embargo, la irreducibilidad ha recibido sólo una caracterización negativa: la negación de la reducción funcional. El problema es que, ya sea como negación del funcionalismo o de algún otro tipo de reducción, siempre recibe una definición negativa: la no-reducibilidad. Y, como recuerda Kim, decir lo que no es algo no equivale siempre a decir lo que es. (Kim 2006b, pág. 557) Afirmar, por ejemplo, que alguien es hermano de alguien, aporta una información definida acerca de dos sujetos y una relación; por el contrario, decir que alguien no es hermano de alguien resulta difuso:

Normally, when K is a kind, or a homogeneous property, non-K is not a kind. I believe relations show a similar characteristic (though perhaps not to the same extent): R may be a significant, homogenous relation but not-R may not be. Being a brother-of is a real and significant relation, but not being a brother-of clearly is not (I am not a brother of George Bush; my computer is not a brother of my car; etc.). Consider irreducibility: shapes are not reducible to colours, and colours are not reducible to shapes. Facts about a country's economy are not reducible to the country's geological facts, nor vice versa. Facts about a person's intelligence are not reducible to facts about his/her kidneys, nor vice versa. Suppose mental facts are not reducible to physical facts, as the emergentist says. Do all these and other possible instances of irreducibility have anything significant in common? Is there a common explanation of the irreducibility for all these cases? (Kim 2006a, pág. 201)

Constituye, por tanto, otra de las tareas del emergentismo la de dar una definición positiva de la emergencia (o varias que cubran los diferentes grados) que sea clara y no pague de una generalidad excesiva.

#### **Posible solución:**

Como ya se mencionó en el apartado 6.4, una definición como la de Baas y Emmeche, pese a tener en cuenta varios de los elementos centrales en la ontología de la complejidad, como los niveles o las interacciones entre partes, constituye aún una aproximación demasiado general. Es cierto que las propiedades emergentes dependen de las relaciones de partes del nivel inferior, pero con dicha afirmación aún no se habría salido del escueto campo de acción de las definiciones del estilo *superveniencia + irreducibilidad*. Es necesario ahondar en cada uno de los fenómenos que componen dicha definición, y para ello se han de tener en cuenta, al menos, todos los desarrollos conceptuales que se han expuesto hasta ahora:

- Mereología: la teoría de los todos y las partes es la herramienta básica que permite expresar la descomposición de los sistemas en elementos relativamente más simples.

- **Fundamentación:** la teoría de la fundamentación o dependencia puede ayudar a describir las relaciones de superveniencia, elementales para hablar de emergencia. Además, permite establecer de forma rigurosa la idea de la dependencia entre niveles.
- **Niveles:** se ha visto que el concepto de emergencia hace referencia inevitablemente al de nivel, puesto que lo que emerge lo hace respecto de algo «inferior» en la escala de composición.
- **Polisemia:** los distintos tipos de emergencia que pueden apreciarse en un sistema complejo comparten un aire de familia, pero algunos poseen características exclusivas, como la irreductibilidad o la causación descendente. Una definición de emergencia que pretenda usarse en una ontología de los sistemas complejos ha de hacer todas estas distinciones si pretende expresar el meollo de este tipo de sistemas.
- **Temporalidad:** el transcurso del tiempo resulta central en la complejidad. Los patrones emergentes no son meras estructuras estáticas, sino que suelen ser procesos o estar imbuidos en procesos. La ontología empleada, por tanto, ha de ir más allá de los objetos y las relaciones para introducir la temporalidad.
- **Espacio de estados:** tanto para definir el fenómeno de la causación descendente a través de condiciones de frontera, como para describir el comportamiento de un proceso, resultará extremadamente útil el concepto de espacio de estados.

Si bien los cuatro primeros elementos han sido ya tratados con más detalle, aún se ha de presentar una reflexión algo más extensa acerca de la temporalidad y los espacios de estados. La temporalidad será tratada en la sección venidera acerca del dinamismo (ver 8.2.1), y un tratamiento algo más completo acerca de los espacios de estados se ofrecerá en una futura sección de este capítulo (ver 8.3.1), pues resultará necesaria para la elaboración de un formalismo de la complejidad. Asimismo, la –por así decir– segunda parte de esta propuesta de solución, se presentará también en dicha sección: una expresión formal de la emergencia, acompañada de su respectivo simbolismo.

### **El problema de la sobredeterminación**

#### **Enunciación del problema:**

El argumento de la exclusión, presentado con anterioridad, viene a concluir que si los verdaderos poderes causales residen solamente en los microestados, es decir, en los componentes últimos de los sistemas, entonces todo lo supuestamente emergente resulta ineficaz causalmente, quedando de esta forma *excluido* de las explicaciones e, incluso, de la ontología.

Sin embargo, convertir en epifenómenos los fenómenos emergentes no es la única salida –aparte de la propuesta– al problema. Si en lugar de eliminar las emergencias, se mantienen como causas, se daría lugar a la sobredeterminación (Kim 2006b, pág. 558): un evento

estaría determinado, a la vez, por dos causas, cada una de las cuales sería suficiente. Al margen de que esta idea resulte defendible o no, desde luego no resulta compatible con la noción de emergencia, pues anula uno de sus principales componentes: la novedad. Que algo emerja y no resulte reducible a sus componentes hasta el punto de ser causalmente eficaz sobre ellos, implica que es en cierto sentido novedoso. Sin embargo, la sobredeterminación termina con esta idea pues, habiendo dos causas suficientes para un fenómeno, se entiende que ambas realizan el mismo trabajo y son sustituibles, de modo que se acabaría con la novedad, con el papel necesario de cierta propiedad emergente que hace que tal sistema sea como es.

**Posible solución:**

Si se quisiera explorar la posibilidad de la sobredeterminación, habría que abandonar la de la emergencia. Sin embargo, como se ha visto, y dado que el propósito de esta tesis es el estudio de los sistemas complejos y la emergencia parece un fenómeno central de ésta, su abandono no parece factible.

Además, y aunque esto no constituya una prueba definitiva en absoluto, algunos de los casos de sistemas complejos o de emergencias –por simples que sean– en sistemas dinámicos que se han mencionado hasta ahora, parecen inclinar la balanza hacia el lado de la emergencia. Y si ésta no es compatible con la sobredeterminación, entonces se podría concluir que la ontología propuesta en esta tesis, junto con algunas evidencias empíricas, hablan más bien en contra de la sobredeterminación.

### **El problema de la emergencia fuerte y débil**

**Enunciación del problema:**

Cabe preguntarse si todo lo que emerge es irreducible a sus componentes, o nada emergente es reducible, o en algunos casos sí, y en otros no. A su vez, es posible que un fenómeno sea ontológicamente reducible (en el sentido funcionalista propuesto más arriba) o epistémicamente reducible, es decir, que puede ser explicado o comprendido utilizando únicamente enunciados sobre sus componentes.

Por lo general<sup>7</sup>, se suele denominar emergencia fuerte a aquélla que no es ontológicamente reducible, y por lo tanto, tampoco lo será epistémicamente. Emergencia débil se denomina, por tanto, a la que sí se puede reducir en el sentido ontológico, y en el epistémico, o bien no es reducible, o bien sí lo es en principio, pero resulta demasiado complicado en la práctica.

La causación descendente, en caso de que exista, aseguraría que el fenómeno no es reducible, puesto que posee un poder causal que no reside en sus componentes. En la emergencia de segundo y tercer orden tal y como expone Van Gulick, parece que se da dicha causación, puesto que existe constricción de los estados posibles del nivel inferior por parte del superior. Así sucede, por ejemplo, en la evolución. Por otro lado, de la emergencia

---

<sup>7</sup>Ver, por ejemplo, el resumen de Chalmers sobre el estado de la cuestión en Chalmers 2006, págs. 244-254 o la reflexión de Bedau en torno a la emergencia débil en Bedau 2008.

de primer orden se dice que es reducible, al menos, en sentido ontológico. Se afirma que se trata únicamente de superveniencia, pero también se dice que no es simétrica entre niveles de descripción, puesto que los conceptos que se emplean para expresarla no son plenamente explicables en términos de los conceptos del nivel inferior. Se presume entonces que resulta, al menos en la práctica, epistémicamente irreducible. Por lo tanto, según las definiciones ofrecidas, se puede afirmar que la emergencia de primer orden es débil, y las de segundo y tercer orden son fuertes.

Sin embargo, hay quien afirma que en realidad toda emergencia es reducible –y por tanto débil– y que la causación descendente no se da, de modo que, aunque en la práctica algunos sistemas se traten como poseyendo propiedades irreducibles, esto simplemente es una postura pragmática, y si nuestro conocimiento de la naturaleza fuera perfecto, o nuestro intelecto más potente, podríamos reducir cualquier propiedad a sus componentes.

**Posible solución:**

Recordando lo que se sugería en la subsección sobre las relaciones, en *Una propuesta ontológica* (ver capítulo 7), se está asumiendo que existen relaciones reales e ideales y, dentro de las reales, hay unas con más fuerza o relevancia que otras. Dicha relevancia ha de ser destacada respecto de algo. Si se dice simplemente que el objeto *A* está a la derecha del *B*, se tenderá a pensar que se trata de una relación débil que para nada crea una entidad compleja más allá de la palabra que la designa. Sin embargo, si se establece que se trata de un conjunto de elementos que se mueven para crear dibujos geométricos, que *A* y *B* estén en tal relación sí posee relevancia. Así, se podría decir que las relaciones relevantes para el estudio de un fenómeno se dan en el contexto del sistema que éstas conforman.

Utilizando estas ideas sobre las relaciones se puede afirmar que, para ayudar a resolver el debate sobre la fuerza de la emergencia, habría que establecer qué es exactamente lo que hay de nuevo entre los elementos que no puede ser descrito por las leyes de dicho nivel: lo nuevo en esencia son relaciones. Se ha de determinar entonces en qué punto estas relaciones se vuelven tan complejas o relevantes como para necesitar un lenguaje nuevo. Pues estrictamente hablando, cualquier relación no-ideal no es reducible a sus componentes, pero no por ello funda un nivel nuevo necesitado de otras herramientas legales y descriptivas. La decisión acerca de la fuerza de las relaciones ha de ser más bien una cuestión empírica: la ontología simplemente provee de unas categorías, las cuales, si están bien elaboradas, encontrarán realizaciones.

Según esta perspectiva de las relaciones el debate no podría zanjarse *a priori*. Esto daría lugar a una posición más o menos neutral. Sin embargo, pueden ofrecerse algunos otros argumentos.

En primer lugar, el partidario de la reducibilidad de toda emergencia, en última instancia, utilizaría la «estrategia del pagaré»: ciertas propiedades no han sido reducidas, pero por principio se puede, y quizá en un futuro se consiga. Pero el hecho de que ciertas propiedades, como el calor, se hayan reducido en el pasado a las leyes matemáticas de sus componentes (mecánica estadística) no quiere decir que toda propiedad aparentemente

emergente pueda ser reducida sino, a lo sumo, que hay un género de propiedades que sí son reducibles.

En segundo lugar, se puede ofrecer un argumento basado en la probabilidad, que apoya la idea de que la descripción reduccionista no es suficiente:

Any of the components of an organism –say, a haemoglobin molecule– can be given an arbitrarily complete and precise description in the language of atomic physics or chemistry, and yet this description will miss something that is nevertheless materially relevant to its structure and its very existence. Specifically, it will provide no hint of why this highly improbable molecular configuration is so prevalent, as compared with the astronomical number of molecular forms that are not present. Haemoglobin, and indeed any complex structure within an organism, has the structure and properties it does because it is embedded in a vast elaborate evolutionary web. This evolutionary disposition is the third-order analogue to the increase in entropy. (Deacon 2006, pág. 140)

Una explicación que opere únicamente en el nivel de los componentes más básicos de la naturaleza no parece poder explicar por qué se dan de forma reiterada ciertas configuraciones de componentes y no otras, las cuales resultan improbables en el sentido de que, dentro del conjunto de todas las combinaciones posibles, representan una pequeña parte.

Se ha sugerido que podría carecer de sentido tratar de dirimir el debate de una forma *a priori* y que, además, una de las partes en disputa podría tener ciertas dificultades para explicar algunos fenómenos. Pero además, y unido a todo esto, cabría hacerse la siguiente pregunta: ¿tendría la resolución del debate alguna diferencia en la práctica? Es decir, la diferencia entre una propiedad irreducible en principio y una irreducible en la práctica pero reducible en principio, a la hora de describir la ontología de un sistema, tiende a ser nula, pues, aunque se establezca que es reducible, si no se posee la descripción de tal reducción, habría que seguir operando como si fuera irreducible.

Por lo tanto, parece que la postura recomendable a tomar es la de utilizar la ontología que mejor permita entender los sistemas, sin obviar nada y sin añadir entidades innecesarias, y esa parece ser, al menos en principio, alguna que contemple la idea de la emergencia fuerte aunque sea sólo de manera pragmática.

## 8.2. Dinamismo y autorregulación

Se ha visto que una característica esencial de los sistemas complejos es la temporalidad. En primer lugar, porque sus partes se mueven y sus propiedades pueden cambiar o modularse con el tiempo. En segundo lugar, porque gracias a esto el sistema puede adaptarse, aprender o evolucionar, dando lugar a nuevas estructuras o patrones de comportamiento.

La capacidad de un sistema de cambiar su configuración a lo largo del tiempo podría denominarse, en general, dinamismo. Gracias a este dinamismo, y a las emergencias que surgen de él, el sistema puede mantenerse en ciertos estados sin necesidad de una ayuda externa, es decir, se autorregula.

Resulta pertinente, por tanto, tratar de profundizar en estos conceptos, ofreciendo una descripción detallada de cada uno de ellos de cara a completar una ontología de la complejidad.

### 8.2.1. Dinamismo

Como primera aproximación, se puede entender que un sistema dinámico consiste en un conjunto de estados que evoluciona según unas reglas:

A dynamical system consists of two parts: the notions of a state (the essential information about a system) and a dynamic (a rule that describes how the state evolves with time). The evolution can be visualized in a state space, an abstract construct whose coordinates are the components of the state. In general the coordinates of the state space vary with the context; for a mechanical system they might be position and velocity, but for an ecological model they might be the populations of different species. (Crutchfield y col. 1995, págs. 37-38)<sup>8</sup>

Esto significa que, a la hora de estudiar un sistema, como cualquier otro fenómeno, no se puede tratar de abarcar la totalidad de éste, sino que se seleccionan ciertas variables relevantes, llamadas variables de estado. El valor de esas variables relevantes en un momento dado constituye un estado del sistema. (Zill 2005, pág. 28) El espacio de estados será entonces el conjunto de estados por los que el sistema pasa. A su vez, estas variables están relacionadas por una serie de reglas que constituyen la dinámica del sistema. La trayectoria de un sistema representa la sucesión de sus estados debida a su dinámica. Esta dinámica proviene, en gran medida, de las relaciones que mantienen las partes entre sí:

Cuando hablamos de estudiar su comportamiento, estamos asumiendo que los sistemas cambian con el tiempo (es decir, que los atributos asociados a ellos sufren variaciones; por eso registramos sus trayectorias) y que nos interesa dar razón de esos cambios (buscamos una descripción racional del comportamiento). Resulta especialmente importante el caso en que esos cambios se generen endógenamente; es decir, resulten básicamente de las tensiones que se producen en el seno del sistema, mediante las relaciones entre las partes que lo forman. Ello no excluye la posibilidad de considerar la acción de eventuales factores externos, pero para nosotros lo más significativo en la descripción del comportamiento serán las propias tensiones internas. Estas tensiones vienen

---

<sup>8</sup>Crutchfield en *Chaos*, escrito perteneciente a *Chaos and complexity* (Russell, Murphy y Peacocke 1995).

determinadas por las interacciones entre las partes del sistema, que suministran, a su vez, el vínculo que articula a esas partes en la entidad que es el sistema. En este sentido hay que resaltar que el término dinámico tiene una connotación no sólo de cambio, sino de la fuerza (del dinamismo) que lo engendra. (Aracil y Gordillo 1997, pág. 16)

Por ejemplo, un péndulo es un sistema dinámico con los siguientes elementos (basado en Crutchfield y col. 1995, págs. 37-38):

- Variables: posición y velocidad
- Dinámica: la ley del movimiento pendular, fruto de la aplicación de la segunda ley de Newton:  $l\ddot{\Theta} + g\sin\Theta = 0$  (siendo  $l$  la longitud del hilo,  $\Theta$  el ángulo que éste forma respecto de la vertical y  $g$  la aceleración de la gravedad)
- Estados: la relación posición/velocidad en cada instante. Puede representarse como un punto en un plano cuyos ejes de coordenadas sean la posición y la velocidad.
- Su trayectoria, en el caso de que no exista rozamiento, se corresponderá con la forma de un círculo. Si existe rozamiento, tendrá la forma de una espiral. Su espacio de estados será la suma de los puntos de su trayectoria.<sup>9</sup>

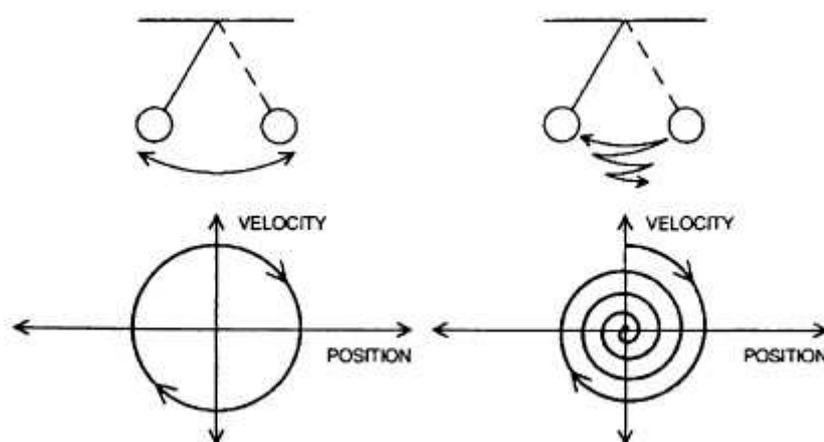


Figura 8.1: Esquema de sistemas dinámicos de Crutchfield

Se ha visto cómo muchos autores asocian la no linealidad con los sistemas complejos, incluyendo muchas veces la complejidad dentro del campo de los sistemas dinámicos no lineales. Resulta pues, necesario, para el estudio de la complejidad ahondar en la distinción entre sistemas lineales y no lineales, pero para explicar esta diferencia se han de hacer antes algunas precisiones acerca de la forma matemática de los modelos.

<sup>9</sup>La figura 8.1 ilustra la evolución de los parámetros a lo largo del tiempo. Imagen tomada de Crutchfield y col. 1995, pág. 38.

La forma matemática de describir la dinámica de un sistema es a través de ecuaciones diferenciales. Estas ecuaciones contienen la derivada de una o más variables dependientes respecto de una o más variables independientes (Zill 2005, pág. 2), lo que permite representar la variación de cierta cantidad respecto de otra, como por ejemplo, la posición respecto del tiempo, o, como en el caso del péndulo, la velocidad respecto de la posición.

Una de estas ecuaciones se denomina lineal, a grandes rasgos, cuando la suma de dos de sus soluciones también constituye una solución. (Zill 2005, pág. 297) Es decir, se tiene algo del estilo  $f(a + b) = f(a) + f(b)$ . Se denomina no lineal a la ecuación en la que no sucede esto, es decir, que para solucionarla no se puede analizar en funciones elementales. (Zill 2005, págs. 100-101) El modelo depredador-presa de Lotka-Volterra (empleado por Holland como ejemplo de no linealidad en Holland 2004, págs. 33-34) es un buen ejemplo de este tipo de sistemas, en el que se ve la interdependencia de dos fenómenos, expresada como el producto de las dos variables que los representan, de forma que no se pueden analizar por separado en funciones más simples. En este sistema se expresa la relación entre la población de un depredador, por ejemplo, zorros, con la de una presa, como los conejos. Cuando existen muchas presas, la población de depredadores aumenta debido a la disponibilidad de alimento, de tal forma que con el tiempo, disminuye el número de presas por aumentar el número de ataques por parte de depredadores. Esto hace que, a su vez, disminuya la población de depredadores por inanición. A la larga, esta falta de depredación provoca un aumento en la población de presas, etc. El gráfico de la figura 8.2 muestra esta evolución.<sup>10</sup>

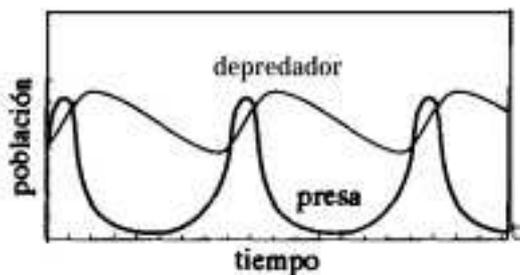


Figura 8.2: Esquema del modelo Lotka-Volterra

Un sistema no lineal será, por tanto, el que presenta algún comportamiento no lineal, es decir, una dinámica que haya de ser representada mediante ecuaciones no lineales.<sup>11</sup>

<sup>10</sup>Imagen tomada de Zill 2005, pág. 101

<sup>11</sup>La manera de estudiar los sistemas dinámicos a través de ecuaciones diferencias es, por así decir, la tradicional, pero no la única que se emplea hoy en día. Por ejemplo, para representar procesos aleatorios se emplean funciones de distribución, que no dibujan una trayectoria o un conjunto de trayectorias en el espacio de estados, sino un sector. Por ejemplo, Prigogine utiliza este método para matematizar la irreversibilidad termodinámica: la aleatoriedad en el micronivel se traduce en irreversibilidad en el macronivel. (Baianu, Brown y Glazebrook 2007, págs. 232-234)

En ocasiones, tratando el concepto en un sentido más amplio, se trata «no lineal» y «emergente» como sinónimos, pues en ambos casos el todo (la dinámica del sistema) no es descomponible en la suma de sus partes (o la suma de sus soluciones). Sin embargo, resultará más conveniente emplear el término de emergencia tal y como se ha desarrollado, separado del de no linealidad, para así facilitar el estudio de la relación entre ambos conceptos, que no parece *a priori* clara. Es decir, estudiar si es la no linealidad lo que hace a un sistema tener propiedades emergentes, o al revés, o ambas cosas son lo mismo.

El concepto de condiciones de frontera parece provenir también del estudio matemático de los sistemas dinámicos a través de ecuaciones diferenciales. Las condiciones de frontera en este sentido son puntos por los que las soluciones de las ecuaciones deben pasar, y que por tanto restringen el número de soluciones aceptadas dado un determinado sistema. (Zill 2005, págs. 114-115) Es decir, que si se piensa en las posibles soluciones de un sistema como curvas en un gráfico, sólo serían aceptadas las curvas que contuvieran los puntos especificados. Si las soluciones de las ecuaciones son la sucesión de los estados por los que el sistema puede pasar, entonces se tiene la definición anteriormente dada de condiciones de frontera: una restricción de los estados posibles del sistema. La interpretación ontológica de este fenómeno podría ser: hay partes del sistema que, en relación con otras, inhiben ciertos patrones de cambio y que, por tanto, alteran la dinámica global del sistema.<sup>12</sup>

Además de como lineales o no lineales, los sistemas pueden calificarse según su comportamiento sea más o menos ordenado o predecible. Como ya se ha mencionado con algo de detalle en la sección de Johnson y, sobre todo, en la de Kauffman (ver secciones 2.3.2 y 2.3.4), un sistema caótico es aquél en el que el comportamiento, pese a ser generado a través de reglas relativamente sencillas, tiende a ser aleatorio e impredecible. Cuando esto sucede se dice que el sistema dinámico posee un atractor caótico. Conviene entonces recordar qué es un atractor y cuáles son sus tipos<sup>13</sup>:

- Un atractor es el punto hacia el que se mueven las trayectorias que describen el comportamiento del sistema en el espacio de estados. El conjunto de puntos que se convierten en atractores se llama «cuenca de atracción». Existen varios tipos de atractores, entre los que se encuentran los siguientes:
  - Punto fijo: produce un movimiento pendular que termina por pararse
  - Ciclo límite: funciona como un reloj, haciendo siempre el mismo movimiento
  - Toro: da lugar a movimientos cuasi-periódicos

---

<sup>12</sup>Según se ha visto, algunos autores afirman que estas condiciones no sólo inhiben, sino que también amplían el espacio de estados. Sin embargo, la idea no parece tener sentido a la luz de esta interpretación matemática del término. Es posible que hagan uso de una noción de causación descendente ampliada que incluya no sólo el fenómeno de inhibición, sino de emergencia de la novedad. Sería esta novedad la que hace que los estados posibles se amplíen.

<sup>13</sup>Basado en la exposición de Crutchfield en Crutchfield y col. 1995, págs. 8-12. De nuevo se remite también a la sección de Kauffman, en la que hay un tratamiento sobre los atractores de un sistema con ejemplos específicos sobre complejidad.

- Caótico: resulta impredecible a largo plazo (a diferencia de todos los anteriores) y posee una alta sensibilidad a las condiciones iniciales

Lo contrario de un sistema caótico será, por lo tanto, un sistema totalmente predecible. En el ejemplo del péndulo, conociendo las ecuaciones (dinámica) y sabiendo en qué momento y posición ha comenzado a moverse (condiciones iniciales) se puede calcular sin problema en qué posición se encontrará en cualquier momento.

Se ha estudiado también con anterioridad la afirmación de que los sistemas complejos se encuentran, al menos en algunos momentos, oscilando entre estos dos estados (el orden y el caos). Esto no quiere decir sino que, tanto un comportamiento excesivamente caótico, como uno excesivamente ordenado, entorpecen en exceso la aparición de nuevas estructuras. El exceso de orden por tender al inmovilismo, y el exceso de aleatoriedad por ser incapaz de preservar los cambios adaptativos para poder transmitirlos.

### **8.2.2. Autorregulación**

En general, cuando se afirma que algo se regula, significa que existe cierto estado, o rango de estados, en los que debe permanecer dada cierta situación. Por ejemplo, se regula la temperatura de la habitación en función de nuestra sensación de frío o calor abriendo la ventana, o la velocidad del vehículo según las circunstancias de la vía. Un aspecto del sistema cambia en función de algo (una meta u objetivo), y no aleatoriamente (de esta forma, sería un sistema caótico).

En el caso del automóvil o la temperatura, las acciones eran llevadas a cabo por un agente externo: es simple regulación. En cambio, cuando esta regulación se lleva a cabo desde dentro del propio sistema, se denomina autorregulación. Por ejemplo, si la temperatura se regulara mediante un termostato al que se le ha fijado un valor de temperatura específico.

Por supuesto, la autorregulación sólo puede suceder en sistemas dinámicos, puesto que algún aspecto del sistema tiene que ser capaz de cambiar para poder ser modificado y, así, regulado. El dinamismo se considera así una condición necesaria para la autorregulación.

Siguiendo la idea de Ashby expuesta al comienzo de la tesis (ver sección 2.2.1) se puede entender la autorregulación como la selección de ciertos estados del sistema dentro de todos los posibles. Pese a las críticas que ha recibido la homeostasis en general y la máquina de Ashby en particular, parece que esta idea se puede seguir manteniendo, pues es lo que ocurre en esencia en un sistema complejo, como se ha estudiado anteriormente: de entre todos los estados posibles, algunos caóticos y otros de alto orden, el sistema queda confinado en un espacio determinado. Es en este sentido en el que se considera la emergencia de lo complejo como improbable, según los conceptos de la mecánica estadística.

Buckley adelantó la idea de que para la autorregulación es necesaria variación, un mecanismo de selección para esa variación y otro que permita transmitir las variaciones seleccionadas. No simplemente se mantienen estructuras, como parece afirmar Ashby, sino

que se crean otras nuevas a partir de estas variaciones. Sin embargo, estas ideas han de aclararse, puesto que no siempre que aparece algo novedoso en un sistema –como se ha visto al tratar los diferentes sentidos de emergencia– aparece una estructura. Por ejemplo, cuando un animal adquiere cierto recuerdo que le permite regular su conducta en el futuro, parece que cabría hablar más bien de aparición de un nuevo patrón o comportamiento en el sistema. Sin embargo, el esquema propuesto sigue siendo válido: aparecen variaciones, el dinamismo del sistema permite, mediante algún mecanismo, seleccionar algunas de ellas (en el caso del animal, el aprendizaje), y otro mecanismo, reproducirlas (memoria). Este mecanismo de selección respecto de la novedad puede seguirse viendo, al modo de Ashby, como una selección dentro del espacio de estados.

Se suele entender que los elementos básicos de un sistema dinámico son los bucles de realimentación o retroalimentación (o *feedback*). Existen bucles de realimentación positiva y negativa.

La realimentación negativa consiste en una corrección autónoma de las perturbaciones que apartan al sistema del comportamiento deseado. Es decir, que en el sistema se ha fijado un cierto valor para una variable, y éste ofrece resistencia al cambio cuando se lo aleja de dicho valor, retornando a él. (Aracil y Gordillo 1997, págs. 30-33)

Por su parte, un bucle de realimentación positiva, funciona de la siguiente manera: cuando existe una perturbación de un valor, ésta tiende a reforzarse a lo largo de toda la cadena. Resulta un comportamiento, entonces, inverso a la realimentación negativa. Este refuerzo ocurre porque, debido a la estructura de bucle, la salida del sistema se convierte en entrada, provocando aumentos o disminuciones sucesivas. (Aracil y Gordillo 1997, págs. 33-38)

Parece viable que, a través de estos dos tipos de bucles, así como encadenamientos de ellos, se logren sofisticados dispositivos de autorregulación. Como se ha visto, en una reacción autocatalítica, que supone la base de muchos sistemas complejos, se observa un bucle de realimentación positiva, pues el producto de la reacción es a la vez lo que permite iniciarla. En el cuerpo de un animal se tienen múltiples ejemplos de bucles negativos, cada vez que se observa que el organismo trata de mantener cierta cantidad de una sustancia en la sangre dentro de un determinado rango, adaptándose a la alimentación del animal, como por ejemplo el nivel de colesterol. Sin embargo, estos fenómenos pueden observarse en otros sistemas que no cabría denominar como complejos: un termostato, el ciclo de las adicciones, la evolución de una inversión insuficiente, etc. (Aracil y Gordillo 1997, 83 y ss)

Y es que, aunque estos mecanismos sean, seguramente, necesarios para la complejidad, no parece que sean suficientes puesto que, si nos fijamos en todos ellos, tienen algo en común: su autorregulación es relativa o, por decirlo así, incompleta. Esto se ve claro en un caso de sistema artificial como el termostato: el valor al que debe mantener la temperatura le ha sido impuesto desde fuera, no ha sido seleccionado desde dentro de la propia dinámica producida por la relación entre sus partes. No sucede exactamente lo mismo en el caso natural del cuerpo animal: el bucle de realimentación controla ciertos sistemas, pero ese

bucle ha sido impuesto por otros mecanismos (evolutivos) de selección (natural), quizá ajenos al propio bucle, pero no completamente ajenos a la dinámica del sistema. Parece entonces necesario que, para que un sistema sea completamente autónomo, es decir, para que su autorregulación emerja de la propia dinámica del sistema, es necesaria una suerte de mecanismo de selección interno.

Se ha visto con anterioridad que una de las propiedades más básicas –si no la que más– de la selección en los sistemas complejos es la causación descendente. Es lo que hace que un mecanismo de selección pueda confinar al sistema en un subconjunto dentro del espacio de estados, es decir, «elegir» qué estados van a ser viables. La causación descendente proviene de una emergencia fuerte, la cual, a su vez, proviene de las interacciones entre las partes del sistema de un nivel inferior, lo que permite que, en definitiva, sea la propia dinámica y estructura del sistema la que lo guíe, seleccionando los valores a los que, por así decir, «debe aspirar». Esta causación descendente es una propiedad ontológica que se manifiesta en el mundo natural de incontables maneras, como la selección natural, la influencia de las sucesivas estructuras en la formación del copo de nieve, la restricción del movimiento del líquido en las células de Bénard, la influencia de las capacidades mentales en la conducta, etc.

Estos mecanismos de selección actúan, a su vez, sobre las distintas posibilidades que las diferentes formas de variación ofrecen. Las maneras en las que se expresa la variación van desde el movimiento caótico de las partículas de un gas o los flujos de un líquido en un recipiente, hasta fenómenos más sofisticados como la mutación genética. Estos fenómenos dan lugar al espacio de estados «en bruto», el cual se irá acotando tras la emergencia de las sucesivas jerarquías.

A lo largo de la exposición se ha estado siguiendo el esquema propuesto por Buckley de variación-selección-transmisión. Se han enumerado algunos casos de variación, se ha expuesto la estructura ontológica de la selección, así como algunos ejemplos; falta especificar, por tanto, a qué nos referimos con «transmisión».

La transmisión consiste, de forma general, en la perpetuación de un valor o estructura a lo largo del tiempo dentro de un sistema, así como la copia de éstos, o de cierta información acerca de ellos, en los casos en los que el sistema se replica o tiene descendencia. Según esta definición, cabría entonces considerar los bucles de realimentación como mecanismos de transmisión. En el caso del bucle negativo, el valor es conservado; en el caso del bucle positivo, el valor es amplificado; pero en ambos existe una transmisión. Esta amplificación se ha mencionado al tratar la emergencia, cuando se ha señalado que en ocasiones una pequeña perturbación del micro-nivel aumenta y adquiere importancia en un nivel superior. Varios ejemplos de bucles positivos ya se han expuesto. Sin embargo, es posible observar otros fenómenos de transmisión que parecen, en principio, ir más allá de este tipo de bucles: la memoria, el aprendizaje, la escritura, el ADN, el lenguaje, las telecomunicaciones, etc. Estos fenómenos de alto nivel se manifiestan en sistemas complejos tales como animales,

sociedades y células, y han de ser tenidos en cuenta a la hora de lidiar con una ontología de los mecanismos de transmisión.

Se ha afirmado en repetidas ocasiones que el sistema tiene marcados ciertos valores objetivo o «metas». Esta idea evoca, de forma inevitable, la noción de teleología. Para tratar de evitar los clásicos problemas que trae este concepto, resulta importante comprender de dónde proviene ontológicamente el fin, puesto que si éste se entiende como causa eficiente, se incurre en una paradoja: algo que no es real, no es efectivo, por ser futuro, es causa de algo real. Aquí entran en juego precisamente la causación descendente y la emergencia: es el sistema, por su propia forma, el que se inhibe y dirige hacia ciertos rangos de valores. El sistema se encauza a sí mismo a partir de mecanismos propios, dependientes de su propia dinámica y de su manera de instanciar la estructura variación-selección-transmisión. Es en este sentido en el que se movía el análisis de Bertalanffy en torno a la teleología, cuando afirmaba que se trataba de un concepto útil para describir los sistemas, pero sin olvidar que este fenómeno es fruto de la causalidad, y que cuando se habla de fines, se está en realidad hablando de atractores en un sistema de ecuaciones.

### 8.2.3. *Autopoiesis*

Como señalan Bertalanffy, Maturana y Varela o Prigogine, se dan casos de sistemas autorregulados en los que no existe simplemente una suerte de «fijación autónoma de las metas», sino además, y ante todo, una «auto-construcción». Siguiendo el lenguaje de Bertalanffy, que después será empleado de forma habitual a la hora de hablar sobre complejidad, hay sistemas que no están sólo abiertos al entorno en cuanto a intercambio de información, sino también en cuanto a intercambio materia y energía. Esta apertura de información y energía se suele asociar con la complejidad: son los sistemas complejos los que toman y procesan partes de su entorno para, por ejemplo, crecer o reparar daños en su estructura. Así, un animal gestándose o alimentándose. Sin embargo, cabe plantearse si esta apertura es exclusiva de la complejidad, y si, además, es una condición necesaria de ésta.

En cuanto a la primera cuestión, parece prácticamente imposible encontrar un sistema que sea capaz de coordinar por sí mismo su propia construcción mediante su interacción con el entorno y que no sea un sistema complejo. Parece razonable mantener, aunque sea de forma provisional, que sólo los sistemas complejos son capaces de *autopoiesis*. Ahora bien, la segunda cuestión puede plantear dudas más profundas.

Gran parte de los ejemplos que se suelen ofrecer a la hora de ilustrar qué es un sistema complejo, parecen hacer gala de esta auto-constitución o auto-construcción, al menos en ciertos sentidos. Véase cualquier ejemplo de vida animal o vegetal, así como muchos de los procesos que las componen. Es decir, que el animal se alimenta de su entorno, lo explora y también deposita materia en él. Su circulación sanguínea, respiración, rutas metabólicas, digestión, etc. son, a su vez, procesos de autoconstrucción por el hecho de «converger», por decirlo así, en el individuo del que son parte. Otros procesos considerados superiores en

complejidad, como los cognitivos, también se nutren de estos procesos básicos, y a su vez los posibilitan, pues permiten relacionarse con el entorno de maneras diversas (estrategias de solución de problemas, alimentación, etc.).

Uno de los ejemplos más comunes, el del hormiguero, puede comenzar a presentar problemas, y es que parece difícil considerar un hormiguero como un organismo al uso. No parece una entidad «ortodoxamente *autopoiética*». Sin embargo, también podría caracterizarse como intercambiadora de información y energía con el medio. El forrajeo de las hormigas, rastros de feromonas mediante, sustenta al hormiguero en su conjunto: las hormigas exploran, marcan ciertas zonas, traen alimentos, lo que les permite mantenerse, procrear, continuar construyendo, etc. Parece un sistema complejo constituido de pequeños sistemas complejos.

Otro caso problemático: la formación de un copo de nieve. Si bien es cierto que el copo se «nutre» de materia del entorno (agua) que forma sucesivas estructuras cristalinas que influyen unas en la formación de las otras, y en este caso existe cierta apertura, también es cierto que se trata de la emergencia de una mera estructura. El copo surge debido a ciertas condiciones de presión y temperatura y es arrastrado por el viento. Pero no lleva a cabo ninguna función debida al dinamismo de sus partes: no se repara, no se alimenta, no interactúa, no cambia. Parece un caso en el que hay apertura (al menos durante cierto tiempo), hay emergencia (candidata a emergencia fuerte), pero no parece haber complejidad. No sirve, entonces, cualquier apertura, sino la que es continuada en el tiempo y deriva del dinamismo interno del sistema.

Un atasco de coches ha sido también propuesto como sistema complejo (Neil Johnson). Existen en él, desde luego, multitud de elementos en interacción. Emergen también patrones (nuevos comportamientos en los coches). Pero, a no ser en un sentido retorcido, no se da desde luego ningún intercambio de materia, sino sólo de información. Además, caben serias dudas de que la emergencia de que hace gala sea fuerte en algún sentido y no sea más bien una emergencia de primer grado. Desde luego, el comportamiento del atasco no se puede dar en un coche aislado, pero éste no parece ópticamente irreducible; de hecho, puede que ni siquiera lo sea epistémicamente (Tachet y col. 2016). Otros ejemplos de este tipo podrían tener problemas parecidos, como la emergencia en autómatas celulares.

Se han descrito, a lo largo de las secciones precedentes, varios mecanismos y fenómenos. Sin embargo, esto no otorga un patrón que permita discernir qué es un sistema complejo y qué no. Se hace necesaria, por esta razón, una definición clara de qué sea un sistema complejo. Pero no ha de olvidarse que el concepto de sistema complejo ha surgido al hilo de una serie de problemas, y por tanto, son estos problemas característicos los que habrían de guiar tal discernimiento: emergencia (preeminentemente fuerte), difícil o imposible predicción, gran cantidad de elementos en interacción, necesidad de visión de conjunto, etc. Resulta en extremo complicado, aun así, determinar hasta qué punto las emergencias son realmente fuertes o débiles, o hasta qué punto esa impredecibilidad es transitoria, a la espera de una teoría o tecnología diferentes. De la misma forma, y pese a que la definición

de complejidad que se ofrezca trate de tener en cuenta todos los problemas y características de los sistemas complejos, resultará complicado separar de forma neta la convención de lo fáctico.

En definitiva, el concepto de emergencia, y una presunta definición ontológica del mismo, pretenderán ser más bien herramientas de análisis útiles, y no raseros que permitan sacar y meter sistemas dentro de determinados conjuntos. Por tanto, y a la luz de los ejemplos mencionados en párrafos anteriores, quizá resulte útil, en analogía con la emergencia, distinguir varios grados o tipos de complejidad. Pero antes de ello, se impone una recapitulación de lo dicho hasta ahora acerca de la ontología de las propiedades de un sistema complejo, en orden a expresarlas de manera clara y formal, así como a elaborar el lenguaje básico sobre el que se edificará una noción rigurosa de sistema complejo.

### 8.3. Un formalismo de la complejidad

Respecto del esquema que, varios capítulos atrás (ver 3.1), pretendía ordenar las principales características de los sistemas complejos en un orden de preeminencia ontológica, se pueden hacer unas últimas observaciones basadas en las recientes reflexiones para ofrecer, por fin, una suerte de esquema definitivo.

En primer lugar, se ha podido observar que, de la misma manera en que la emergencia permite la causación descendente, en ciertos casos al menos, la causación descendente permite la emergencia. Esto es así debido a que los nuevos procesos moldeados por esta causación, pueden a su vez interactuar con otros dando lugar a nuevas emergencias.

A su vez, estos dos fenómenos, la causación descendente y la emergencia, se nutren de la variación y la multiplicidad que están a la base del esquema: sólo ciertas variaciones (combinaciones de partículas, configuraciones genéticas, etc.) son «seleccionadas» por la causación descendente, y son «amplificadas» por la emergencia. Pero la variación también se nutre de aquéllos: lo emergente y lo seleccionado supone, a su vez, nuevas posibilidades de combinación.

Además, la emergencia, junto con la causación descendente, de la cual supone la condición de posibilidad, permiten a su vez la aparición de autorregulación. Es decir, que sólo a través de una emergencia que opere causalmente sobre la variación y la multiplicidad puede aparecer la selección de estados, que a su vez supone la condición misma del control y la regulación: el sistema, debido a su propia dinámica, consta de fenómenos que permiten unos estados y desechan otros.

Resulta necesario, por último, añadir el concepto de temporalidad o dinamismo al esquema, pues como se ha visto, existen multiplicidades estáticas dotadas de cierto tipo de emergencia que, a todas luces, no suponen fenómenos complejos.

La forma final del esquema sería, de más sencillo a más complicado, así:

- Pluralidad / Multiplicidad
- + Tiempo = Dinamismo

- Autorregulación, Emergencia y Causación descendente forman un triángulo de elementos que se relacionan de forma muy estrecha

Con esto sólo se ha indicado cierto orden en los fenómenos complejos, pero evidentemente, este análisis dista mucho aún del nivel de detalle y la claridad deseados. Los fenómenos mencionados son aún demasiado bastos y abigarrados, por lo que resulta conveniente descomponerlos en conceptos aún más sencillos para su examen, y poder completar así una ontología de los sistemas complejos.

Conviene recordar se aleja mucho de la tarea de dicha ontología el hallar las leyes que rigen los sistemas complejos (si es que existen tales leyes más allá de varios fenómenos comunes), sino que, a lo sumo, se intenta delimitar el universo del discurso sobre el que se aplicarían dichas leyes: hay ciertos entes; dentro de estos entes, algunos que son compuestos, se denominan complejos, y poseen ciertas características, que se relacionan de cierta manera.

La ontología empleada para descomponer los fenómenos complejos hará uso de las nociones de objeto, propiedad y relación, las cuales se considerarán entidades primitivas. A partir de éstas, y empleando las nociones ya descritas de parte, fundamentación, nivel, etc., se tratará de construir de forma precisa las definiciones de estado, espacio de estados, proceso y estructura, para finalmente esbozar una definición de sistema dinámico, y a partir de ésta, de un sistema complejo y sus fenómenos. En lo que sigue se presentará una especificación de todos los conceptos, junto a sus expresiones simbólicas acompañadas de explicaciones y puntualizaciones.

### **8.3.1. Expresión simbólica de las propiedades de los sistemas complejos**

Se ofrece a continuación una enumeración de los principales elementos de la ontología que se empleará, junto a una definición previa que en páginas siguientes será matizada, ampliada y explicada. El objetivo de esta enumeración será el de presentar los conceptos básicos que serán utilizados en las definiciones para, a continuación, presentar la expresión simbólica de dichos conceptos y algunas reglas de composición de las expresiones. De esta forma, el simbolismo quedará explicado de una vez, y el desarrollo y glosa de las definiciones no se verá interrumpido.

- Entidades primitivas:
  - Objetos: las entidades de las que se predicán las relaciones y las propiedades (animales, máquinas, sistemas, etc.)
  - Propiedades: las entidades que permiten distinguir un objeto de otro (colores, olores, formas, texturas, etc.)
  - Relaciones: las entidades que suponen cierto enlace entre otras entidades. Pueden ser espaciales (estar junto a, estar alejado de, ...), causales, ideales o lógicas (esta propiedad es similar a ésta, el objeto  $x$  es idéntico a  $y$ ,  $x$  se deduce de  $y$ , ...), etc.

- Entidades derivadas:
  - Nivel: entidad formada por los objetos de una misma especie, cuyas partes propias forman parte de un nivel inferior, y así sucesivamente.
  - Estado: la configuración de objetos, relaciones y propiedades de un sistema en un determinado momento. A partir de esta noción se construye la de espacio de estados como un conjunto de estos estados.
  - Proceso: una entidad compuesta de objetos, relaciones y propiedades que se influyen a lo largo de un periodo temporal (respiración, digestión, degradación, transporte, etc.).
  - Estructura: un conjunto de objetos, propiedades y relaciones estable durante cierto periodo de tiempo y que, desde el punto de vista de los sistemas dinámicos, permite o sustenta algún proceso (vasos sanguíneos, huesos, engranajes, mitocondrias, etc.).
  - Sistema: conglomerado de procesos, que suelen operar en varios niveles, y que confluyen en ciertas tareas u objetivos.
  
- Procesos complejos:
  - Emergencia: la aparición de nuevos procesos, propiedades o estructuras. Se distinguen en ella varios órdenes y fuerzas.
  - Causación descendente: la influencia de un nivel superior sobre uno inferior, modificando sus posibilidades de desarrollo.
  - Autorregulación: fenómeno que se observa en ciertos sistemas que son capaces de dirigirse hacia ciertos objetivos sin que éstos le sean inoculados externamente.
  
- Nociones auxiliares:
  - Reglas: funciones que relacionan el estado de ciertas variables, o que describen el comportamiento de los agentes. Las leyes se consideran reglas o regularidades necesarias, que son instanciadas por relaciones necesarias.
  - Tiempo: se utiliza a través de una variable ' $t$ ' numerada, que permite expresar flujos y cambios.

En cuanto al lenguaje simbólico, los conceptos empleados poseen:

- Predicados
  - De definición: expresan que tal entidad es de tal categoría.
    - Primitivos:  $Ob(x)$ ,  $Prop(x)$ ,  $Rel(x)$  ( $x$  es un objeto,  $x$  es una propiedad, etc.).

- Derivados:  $N(x)$ ,  $E(x)$ ,  $Proc(x)$ ,  $Est(x)$ ,  $S(x)$  (nivel, estado, proceso, estructura, sistema).
- Se puede llevar a cabo una predicación grupal:  $Ob(x, y, z, \dots) = \langle x, y, z, \dots \text{son objetos} \rangle$ .
- De especificación: la identificación de una entidad puede quedar especificada temporalmente (este estado se da en este momento) o bien numéricamente (éste es el objeto número siete de la serie de objetos que componen el sistema ‘ $x$ ’). Además, esto puede hacerse de forma puntual (este objeto, este instante) o en forma de rango (este segmento temporal, los objetos del uno al noventa).
  - Puntual:
    - ◇ Temporal:  $E_{t_i}$
    - ◇ Numérica:  $Proc_i/Proc(x)_i$ ,  $N_i/N(x)_i$ ,  $Est_i/Est(x)_i$ ,  $S_i/S(x)_i$ ,  $Rel_i/Rel(x)_i$ ,  $Ob_i/Ob(x)_i$ ,  $Prop_i/Prop(x)_i$ .<sup>14</sup>
  - De rango:
    - ◇ Temporal:  $E_{t_{i-j}}$ ,  $Proc_{t_{i-j}}$ .
    - ◇ Numérica:  $N_{i-j}$ ,  $Est_{i-j}$ ,  $S_{i-j}$ ,  $Rel_{i-j}$ ,  $Ob_{i-j}$ ,  $Prop_{i-j}$ ,  $Proc_{i-j}$ .
  - De especie:  $Ob_\alpha(x)$ ,  $Rel_\alpha(x)$ ,  $Prop_\alpha(x)$ ,  $Proc_\alpha(x)$ ,  $N_\alpha(x)$ ,  $Est_\alpha(x)$ ,  $S_\alpha(x)$ .<sup>15</sup>
- De aplicación:  $P(x)/P_y(x)/P_\alpha(x)$ ,  $R(x)/R_y(x)/R_\alpha(x)$ .<sup>16</sup>
- Expresiones de composición: se utilizan para expresar que tal entidad está compuesta de tales otras.
  - De forma general siguen el esquema «entidad(OPR)», siendo (OPR) un conjunto de objetos, propiedades y relaciones, que pueden quedar sin especificar, especificados puntualmente, por rangos o por especies.
  - Por ejemplo:  $Proc(OPR)_i$ ,  $Est(O_i, P_i, R_i)_{i-j}$ ,  $E(O_{i-j}, P_{i-j}, R_{i-j})_{t_i}$ .
  - En el caso de los sistemas y los niveles, el argumento (OPR) puede ser sustituido por procesos (en los niveles) o por niveles o procesos (en los sistemas), con sus respectivas especificaciones.

<sup>14</sup>Leyéndose «el proceso número  $i$ » y «el proceso  $x$ , que es el número  $i$ », etc.

<sup>15</sup>Leyéndose «el objeto  $x$  pertenece a la especie  $\alpha$ .» Las expresiones con especies se introducen con la idea de poder mencionar grupos de individuos con características comunes (tipos de células, especies animales, etc.). Para expresar la pertenencia de una entidad a una especie, se ha de seguir empleado la nomenclatura presentada anteriormente:  $x \in \alpha$ .

<sup>16</sup>Las expresiones se interpretan, en el orden expuesto, así: «Una propiedad/relación se dice del objeto  $x$ », «La propiedad/relación  $y$  se dice del objeto  $x$ », «Una propiedad/relación de la especie  $\alpha$  se dice del objeto  $x$ ».

- Por último, los sistemas poseen una forma especial compacta para expresar su composición, denominada «matriz sistémica», que tiene la siguiente forma:

$$S(x) = \begin{pmatrix} entidad1_{i-j} \\ entidad2_{i-j} \\ entidad3_{i-j} \\ \dots \end{pmatrix}$$

donde las entidades pueden ser procesos, estructuras, estados, niveles y (OPR).

- Expresiones de pertenencia: se emplean para expresar que una entidad o entidades son partes de otra. En general, puede suceder que, dentro del mismo nivel<sup>17</sup>, objetos, propiedades y relaciones, sean parte de estados, procesos, niveles o estructuras, y que éstos últimos a su vez puedan ser parte de sistemas; por último, dada la transitividad de las partes, tanto objetos, como propiedades y relaciones pueden ser también parte de sistemas. Esto puede expresarse de varias maneras:

- $Pyx$
- $P(Ob(y), S(x))$
- $WF(S(x), Ob(y))$
- $x\pi N, (x, y, z, \dots)\pi S$ <sup>18</sup>

Una puntualización sobre los aparentes conflictos entre subíndices. Como se ha visto, los nombres de algunas entidades pueden llevar varios subíndices de distinto tipo al mismo tiempo. El caso extremo es el de los procesos, que pueden llevar: puntual-numérico, de rango-temporal, de rango-numérico y de especie (de hecho, todas las entidades pueden llevar otro subíndice más el de especie). No tiene sentido que de un proceso se especifique su número en rango y a la vez su número puntual, pero sí el siguiente caso: rango-temporal<sup>19</sup>, rango-numérico y especie. En este caso, los subíndices se separan con punto y coma, recordando que las especies siempre son letras griegas, y los tiempos siempre van acompañados de una  $t$ . El orden preferido es: especie, tiempo, número. Por ejemplo:  $Proc(OPR)_{\alpha;t_{i-j};i}$ .

Una vez terminadas las especificaciones sobre el lenguaje a emplear, se puede comenzar la explicación y definición de los conceptos principales.

<sup>17</sup>Un proceso, por ejemplo, puede ser parte de otro, pero entonces el segundo proceso se encontraría en un nivel superior, al menos en el estricto sentido mereológico. Más adelante se propondrá el concepto de nivel amplio, mediante el que se puede matizar esta idea.

<sup>18</sup>Esta formulación se ha presentado anteriormente (ver sección 7.3.1) como una de las maneras de indicar pertenencia a un nivel, pero puede ser usada para otros tipos de entidades, pues presenta facilidad para llevar a cabo la predicación sobre un grupo amplio de entidades, incluso de tipos heterogéneos. Por ejemplo:  $(Ob_{i-j}, Proc_{\alpha;t_{i-j}})\pi S(x)$

<sup>19</sup>Si se quisiera expresar que un proceso empieza en determinado momento, pero no ha terminado o no se señala, no se usaría la notación puntual, sino de rango, dejando la segunda variable nombrada con la  $j$ . Lo mismo en el caso de un comienzo indeterminado, pero usando la  $i$ .

### Estado y espacio de estados

Un estado es un conjunto de objetos, propiedades y las relaciones que existen entre ellos (un conjunto o conglomerado (OPR)), los cuales representan la configuración del sistema en un momento dado. Se trata de una especie de imagen instantánea del sistema.

Las leyes que gobiernan el sistema dirigen la transición entre estados. Cada estado constituye el fundamento de un estado posterior, es decir, que están entre sí en una relación de fundamentación o dependencia, estableciéndose así una cadena. Esto no quiere decir que todo sistema sea predecible, sino que podemos «reconstruir su historia».

Al hablar de espacio de estados, se ha de distinguir entre espacio de estados posible y espacio de estados efectivo. El espacio de estados posible es el conjunto de todos los estados en los que el sistema se podría encontrar en algún momento dado, según las leyes o reglas que lo rigen. Sin embargo, existen sistemas que, a lo largo de su historia, no pasan por todos los estados por los que podrían pasar, o que, debido a la causación descendente, ven mermados sus estados posibles. Por ello es útil distinguir la anterior noción de la de estado efectivo. El espacio de estados efectivos es el conjunto de estados por los que el sistema sí pasa realmente en una sucesión temporal concreta. En ambos casos, por supuesto, se trata de conjuntos ordenados.

Un sistema dinámico puede considerarse como la suma de sus estados posibles más sus estados efectivos (pues los efectivos por sí solos no describen toda su dinámica).

Las propiedades mencionadas se pueden expresar simbólicamente de la siguiente manera:

- $F(E_{t_{n+1}}, E_{t_n})$
- Los espacios de estados se nombran así:  $EE_p(x)$  = «el espacio de estados posibles de  $x$ », donde  $x$  ha de ser un sistema.  $EE_e(x)$  = «el espacio de estados efectivos del sistema  $x$ ».
- $EE_e(x) \subseteq EE_p(x)$
- $S(x) = EE_p(x) \cup EE_e(x)$
- La definición de cardinal de un espacio de estados, basada en la de cardinal de un conjunto, será de utilidad más adelante:  $Card(EE_p(x)) = \text{número de estados posibles que contiene el conjunto}$

### Proceso

Si un estado capta una instantánea del sistema, un proceso<sup>20</sup> se refiere a un conjunto de (OPR) conectados causalmente que «atraviesan» varios estados efectivos de un sistema. Por ejemplo: se está estudiando la ontología del cuerpo humano en tanto que sistema,

<sup>20</sup>Una distinción similar a la de objetos y procesos, bajo las denominaciones de «*endurants*» y «*perdurants*», se encuentra en Simon y Smith 2004; Smith 2005a; Bittner y Smith 2004 y Smith 2005b.

clasificando algunos de sus procesos (como se hace en algunas ontologías biomédicas (Smith y col. 2005)). La respiración, entendida como entrada y salida de aire en los pulmones, sería un proceso. Está contenida parcialmente en varios estados efectivos, pues es algo que se dilata en el tiempo y no implica la totalidad de las partes del cuerpo, sino sólo algunas como la nariz, la boca, la tráquea, el diafragma, los pulmones, etc. A la vez que este proceso, suceden otros, como la digestión. La digestión implica otro subconjunto distinto de objetos (aunque a la postre ambos procesos estén conectados, por ejemplo, a través del flujo sanguíneo o el ritmo cardíaco), pero puede atravesar los mismos estados efectivos que la respiración: suceden a la vez.

Los procesos pueden ser, por tanto, simultáneos (total o parcialmente) o no simultáneos. Además, pueden estar relacionados entre sí, influyendo causalmente unos en otros o siendo unos condición de posibilidad de otros.

Un sistema dinámico puede considerarse, en cierto sentido, un conjunto de procesos, lo cual puede resultar en ocasiones más útil o cómodo que considerarlo un conjunto de estados o de (OPR).

## Nivel

Anteriormente se ha definido un nivel como una entidad que consiste en la fusión de las entidades que cumplen la siguiente condición, obviando las cláusulas sobre la fundamentación: ciertas entidades constituyen el nivel  $n$ , y sus partes propias el nivel  $n - 1$ , y así sucesivamente hasta llegar al caso límite en el que las entidades ya no tienen partes propias, que constituirían el nivel primero en el orden absoluto.

Sin embargo, como se ha visto, resulta habitual hablar de conceptos como «el nivel de lo mental», «el nivel físico», «el nivel biológico», etc. Estos niveles, por lo general, suelen estar compuestos de varios niveles en el sentido mereológico estricto. Por ejemplo, en el «nivel social» intervienen gran cantidad de entidades, que a su vez son descomponibles en muchas partes propias: neuronas, lenguaje, conductas, economía, metabolismo, etc. Debido a que en muchas ocasiones resultará más cómodo y útil hablar de estos niveles más «gruesos», que podrán denominarse «niveles amplios», se puede tratar de definir el concepto a partir del sentido mereológico de nivel:

Definición de nivel amplio:  $N_A(x)_i =_{def} \exists y(N(y)_j \wedge y\pi N_A(x)_i)$

Como se ve, un nivel amplio es una entidad que contiene varios niveles mereológicos (sólo uno en el caso límite). Al igual que los niveles mereológicos, se fundamenta en otros niveles, a los que contiene como partes, sólo que en esta ocasión estos niveles no son inmediatamente inferiores en el sentido de contener cualquier parte propia, sino que pueden contener varios encadenamientos de partes propias. La fundamentación que existe entre los niveles amplios siempre será débil (como en el sentido mereológico de nivel), pero además, podrá ser mereológica funcional y mereológica fuerte. Es decir, que los distintos procesos, estructuras, etc. que pueblen un nivel amplio pueden encontrarse entre sí en relaciones

funcionales, de dependencia existencial, o de ambas, como suele suceder en los sistemas biológicos.

Es bastante probable que en todos los sistemas se puedan distinguir niveles mereológicos. En cambio, parece plausible que muchos estén contenidos en un sólo nivel amplio, al menos en lo que a las partes relevantes para su dinamismo se refiere. Es decir, que en un sistema como el péndulo, se puede distinguir el nivel de los objetos físicos macroscópicos, pero yendo más allá, se puede hablar de las moléculas, las partículas elementales, etc. Sin embargo, en la medida en que este conjunto de objetos se quiere estudiar como un sistema de movimiento periódico, sólo son relevantes ciertas partes macroscópicas: la pesa y el hilo. Ésta es una de las razones por las que se ha convenido en distinguir, al comienzo del capítulo (ver pág. 116), entre el «sistema total» o porción de la realidad estudiada, por así decir, y el sistema en tanto que es estudiado.

Los sistemas complejos, pese a ser estudiados también a través de simplificaciones teóricas, suelen implicar más de un nivel amplio. Por ejemplo, en el estudio del forrajeo de las hormigas intervienen, al menos, el nivel biológico (los animales y su entorno) y el químico (los rastros de feromonas). En casos más complicados como el de la conciencia humana, pueden intervenir una gran cantidad de niveles, algunos de los cuales poseen una definición imprecisa o incluso, según algunos, dudosa (como el propio nivel mental).

Al estar los sistemas compuestos, en otro sentido, por conjuntos de estados, es claro que también en los estados se pueden distinguir niveles. Pero, además, suele ser posible dividir en niveles, tanto amplios como mereológicos, los procesos que forman parte de un sistema. Por ejemplo, siguiendo con el modelo de la respiración antes mencionado, se puede ver que en ella interviene el nivel de los órganos, pero también los niveles moleculares y de tejidos (alvéolos, glóbulos rojos, etc.).

Cabe señalar que se podría complementar la diferenciación de un nivel respecto de los demás de una manera precisa, si es que los elementos de ese nivel poseen una dinámica o unas leyes propias, por ejemplo, presentando el conjunto de expresiones matemáticas que definan el comportamiento de esos elementos a modo de condición necesaria de pertenencia a dicho nivel. Esto permitiría determinar los niveles sin ambigüedades, además de permitir realizar particiones igual de precisas dentro de un nivel. Por ejemplo, dadas unas ecuaciones diferenciales para cierto nivel, se podrían realizar particiones para los elementos que, debido a ciertas condiciones impuestas, caigan dentro de un determinado rango de soluciones.

### **Estructura**

No todas las partes de todos los niveles de un sistema están en un continuo devenir, aunque formen parte de uno o varios procesos. Por ejemplo, los huesos del cuerpo de un animal sufren cambios (aumentan o reducen su densidad, reparan roturas, algunos producen médula ósea, etc.), pero constituyen una formación estable que permite dar forma y sostener el conjunto del cuerpo, permitiendo que muchos otros procesos se desarrollen. A otros niveles, como el celular, se puede observar el mismo fenómeno: pese a la entrada y

salida de productos, así como ciertos movimientos e incluso cambios de forma, una célula posee una arquitectura concreta y relativamente constante.

Estos conjuntos concretos de (OPR) podrían denominarse estructuras. Distinguir las estructuras del resto de partes de un sistema resulta esencial para comprender cómo lleva a cabo sus procesos, pues se podrá relacionar un proceso o el resultado de un proceso con determinadas partes de las estructuras, estableciendo cadenas causales. Asimismo, la descripción de la aparición de algunas de estas estructuras es la tarea primordial en el estudio de la génesis de algunos sistemas, como los que están sujetos a selección natural.

En casos algo extremos, como los de un enjambre de abejas o la aparición de células de Bénard en un líquido, las estructuras son muy difusas o bien aparecen y desaparecen rápidamente, por lo que quizá resultaría interesante, aunque se hiciera de manera *ad hoc* para cada sistema, distinguir entre ciertos grados de fortaleza, definición o durabilidad estructural, si se diera el caso. Es posible que se pudiera llevar a cabo esta clasificación basándose en las relaciones de fundamentación, como se hizo al distinguir la fuerza de los todos.

Pero en general, se podría definir una estructura como un conjunto de (OPR) que permite, al menos, el desarrollo de un proceso:

$$Est(x) =_{def} x(OPR) \wedge \exists y(Proc(y) \wedge (Fyx \vee Fyx))$$

Esta definición ha sido ideada con los sistemas dinámicos en mente, pues los estáticos, claro está, carecen de procesos. Además, este tipo de sistemas parece presentar un caso límite en el que la estructura y el sistema son idénticos. Si se toma un triángulo: ¿qué diferencia existe entre el sistema –un conjunto de rectas relacionadas por ciertos ángulos– y la estructura que conforman? Resulta plausible entonces pensar que la distinción entre sistema y estructura se ha de reservar para los sistemas dinámicos.

En todo caso, la definición propuesta parece servir incluso en casos de estructuras algo endebles como el de las células de Bénard, pues son las propias células –las estructuras– las que permiten que aparezcan más –el proceso– y el fenómeno se mantenga en el tiempo (dadas las necesarias condiciones de temperatura), debido a que coartan el espacio de estados posibles de muchas de las partículas que forman el fluido.

Sin embargo, en otros casos como el mencionado del enjambre, o un atasco de coches, no parece que quepa hablar de estructura en el mismo sentido, sino preferiblemente de formas o patrones, puesto que su relación con la fundamentación de algún proceso es dudosa o, directamente, inexistente. Los automóviles, al interactuar entre sí, dan lugar a ciertas formas reconocibles, pero no parece que se esté dando lugar a un proceso nuevo, sino simplemente a un entorpecimiento del desplazamiento, proceso que ya existía antes de que existieran dichas formas. Se podría definir entonces un patrón, como alternativa débil a las estructuras, caracterizándolo como un conjunto de (OPR) dominado por una dinámica concreta, que puede ser novedosa o no, pero que no sustenta fuerte o funcionalmente, un proceso. Por ejemplo, los casos de emergencia débil parecen, en su mayoría, patrones de este tipo, como las figuras que aparecen en «El juego de la vida».

### 8.3.2. Una definición de sistema

Una definición habitual de sistema dinámico podría ser la siguiente:

un sistema es un conjunto de partes entre las que se establece alguna forma de relación que las articula en la unidad que es precisamente el sistema. Un sistema se nos manifiesta como un aspecto de la realidad dotado de cierta complejidad precisamente por estar formado de partes en interacción. (Aracil y Gordillo 1997, pág. 11)

En Crutchfield y col. 1995, págs. 37-38 se ha visto una definición similar. Otras más pueden encontrarse, por ejemplo, en Ogata 1987, pág. 1 o Schaffernicht 2009, págs. 9-10. Sin embargo, aunque estas caracterizaciones posean cierta utilidad como elemento introductorio, se muestran insuficientes a la hora de presentar una ontología de los sistemas. Además, y según se han ido desarrollando los conceptos, «conjunto de partes en interacción» podría describir un proceso, un fragmento del espacio de estados o incluso una estructura.

Un sistema dinámico podría caracterizarse, usando todo lo definido hasta ahora, como una entidad que consiste en:

- Una suma de (OPR)
- Los cuales conforman, por lo general, dos tipos de entidades:
  - Procesos
  - Estructuras
- Al ser una entidad extendida en el tiempo, puede ser caracterizada como una sucesión de estados. Esta sucesión de estados está regida por reglas (leyes, patrones, comportamientos...), influidas por las condiciones iniciales y, en ocasiones, por condiciones de frontera. Estas reglas se denominan dinámica del sistema, y la transición entre estados, trayectoria del sistema.
- Resulta habitual, aunque no necesario, que los sistemas sean descomponibles en niveles amplios.

La expresión simbólica podría ser la siguiente:

$$S(x) =_{def} x(OPR) \wedge \exists yz(Proc(y) \wedge Est(z)) \wedge (y, z)\pi S(x) \wedge \exists w(w = Din(x))$$

donde  $Din(x)$  es la dinámica del sistema  $x$ , que podría quedar definida como la función o funciones que describen la transición entre estados del sistema.

Dado que la definición contiene un gran número de términos definidos previamente, su formulación ha sido muy compacta. Quizá, desarrollando de nuevo el contenido de esas definiciones, para después relacionarlas entre sí, pueda exponerse mejor su sentido.

Un sistema dinámico es, en primer lugar, un conjunto de objetos. Estos objetos poseen propiedades y, además, pueden estar relacionados entre sí. Las relaciones de estos objetos pueden dar lugar, básicamente, a dos tipos de entidades. Una de ellos son las estructuras. Éstas consisten en configuraciones estables a lo largo del tiempo que, a su vez, permiten la existencia de las segundas entidades: los procesos. Los procesos están compuestos por varios tipos de relaciones (causales, espaciales, etc.) que se extienden a lo largo del tiempo, y que ofrecen finalmente cierto resultado, que en ocasiones es utilizado por otro proceso del sistema. Estos resultados pueden ir desde sustancias hasta cambios en el propio sistema o en el entorno.

A su vez, el desarrollo y coordinación de los procesos está regido por un conjunto de reglas denominado dinámica. En cada momento del tiempo, el sistema se encuentra en un estado determinado por la configuración de sus objetos, relaciones y propiedades. Otra forma de entender la dinámica consiste entonces en verla como las reglas que definen la transición entre esos estados.

Un sistema es un objeto compuesto que, a su vez, se compone de objetos compuestos. Una buena forma de organizar los diferentes estratos de un sistema, es a través del concepto de nivel. Se puede establecer, a través de él, que un conjunto de procesos se encuentra en cierta posición relativa respecto de los demás, para así reconstruir la jerarquía de composición y, a su vez, la historia causal del sistema: qué está compuesto de qué, qué usa el producto de qué, quién depende de quién, etc. En definitiva, el análisis ontológico de un sistema consiste en destapar el entramado de relaciones mereológicas y de dependencia.

Dada su generalidad, la definición ofrecida puede ser aplicada tanto a sistemas caóticos y sistemas complejos, como a los sistemas dinámicos lineales más simples. Todos ellos poseen unas reglas que definen su dinámica, poseen procesos, objetos relacionados, etc. Sin embargo, existen grandes diferencias en cuanto al comportamiento global de estos sistemas y, sobre todo, en cuanto a su predictibilidad.

Se ha visto, en el ejemplo presentado por Johnson en la sección 2.3.2, que un agente siguiendo una regla muy sencilla, puede dar lugar a resultados impredecibles. Asimismo, Crutchfield recalca (en Crutchfield y col. 1995, 35 y ss.) que el caos es generado por leyes deterministas que no contienen ningún elemento aleatorio. Es decir, que la dinámica, en tanto que conjunto de reglas que gobiernan el sistema, puede quedar descrita con exactitud. Sin embargo, el cuadro de trayectorias que el sistema presenta puede estar poblado por un sinnúmero de ramificaciones. El hecho de que el sistema viaje por una de estas trayectorias depende en gran medida de las condiciones iniciales, variando enormemente el resultado si éstas varían, y haciendo que la predicción a largo plazo sea inviable.

En los sistemas complejos la no predictibilidad procede de la gran cantidad de elementos en interacción, es decir, muchas reglas juntas (del mismo tipo o de tipos distintos) se «suman», dando lugar a un comportamiento nuevo. Además, su capacidad de adaptarse complica aún más la tarea de la predicción: puede desarrollar nuevas respuestas ante estímulos o interacciones provenientes del exterior. Pero a diferencia del sistema caótico, el

complejo posee una estabilidad que lo aleja de la aleatoriedad. Esto puede verse reflejado, como se aprecia en los trabajos de Kauffman, en su comportamiento respecto de los atractores, entre los cuales se mueve en busca de ciertos valores-meta, sin quedar atrapado en ninguno y sin que éstos sean caóticos.

En ambos tipos de sistemas, los caóticos y los complejos, se pueden describir, aunque sea de forma aproximada, algunas de sus posibles trayectorias, demarcando su espacio de estados posibles. Sin embargo, no se puede predecir, por lo general, cuál de los caminos descritos seguirá. Lo cual no quiere decir, como se ha visto, que no posean una dinámica.

El caso de los sistemas lineales presenta un ejemplo de todo lo contrario. Conociendo su dinámica, la cual se puede descomponer en la dinámica de sus partes, se pueden conocer con precisión<sup>21</sup> los estados futuros del sistema.

Como se ha dicho, la definición ofrecida sirve tanto para un péndulo como para un hormiguero, es decir, entidades que si bien parecen compartir una estructura general común, resultan de lo más dispares respecto de ciertos elementos esenciales, como el tipo de comportamiento y su predicción. De modo que si se quiere afinar la estructura teórica presentada hasta el punto de que permita describir de forma algo más precisa la ontología de un sistema complejo, se habrán de incluir los fenómenos que, en principio, son exclusivos de este tipo de sistemas: la causación descendente, la emergencia y la autorregulación.

### 8.3.3. Una definición de sistema complejo

#### Emergencia

Como se ha señalado con anterioridad, no es lo mismo que emerja una propiedad, que un patrón de comportamiento, que una estructura. Sin embargo, y pese a que la entidad resultante es de un género diferente (en un caso es una propiedad, en otro un proceso y en otro una estructura), la definición general comparte los rasgos principales. Se puede denominar emergente a una propiedad/proceso/estructura que:

- debido a la dinámica del sistema, y no por algún añadido externo,
- aparece a partir de un determinado estado del sistema (y puede que desaparezca en un futuro, si cambian ciertas condiciones)

Partiendo de esta base, se pueden distinguir los distintos grados de emergencia:

- Emergencia débil:
  - Emergencia de primer orden: se considera que es, al menos, ontológicamente reducible, y en algunos casos también epistémicamente. Que sea ontológicamente

---

<sup>21</sup>Por supuesto, esto no quiere decir que todos los sistemas lineales sean sencillos de conocer y predecir, sino más bien que su dificultad es epistémica; en cambio, los sistemas complejos y caóticos parecen difíciles o imposibles de predecir debido a su propia ontología.

reducible quiere decir, en el fondo, que es idéntica a su base, pero que se poseen dos nombres o descripciones diferentes (una de ellas abreviada), para expresar lo mismo.

■ Emergencia fuerte:

- Se considera que no es ni ontológica ni epistémicamente reducible, de modo que no es idéntica a su base, así que supone una entidad genuinamente novedosa. Esto hace que pueda considerarse una entidad que se fundamenta en otras entidades, bien en sentido mereológico funcional, o bien en sentido mereológico fuerte.
- Además, este tipo de emergencia aparece en un nivel superior respecto de aquél en el que opera la dinámica a partir de la cual ha surgido (en la débil esto no puede suceder, ya que ambas entidades están en el mismo nivel, puesto que son idénticas). Se pueden distinguir al menos dos tipos de emergencia fuerte:
  - Emergencia de segundo orden: aparece en sistemas autoorganizados y su base son procesos de primer orden, por lo que se considera, según lo dicho, relativamente dependiente de ellos.
  - Emergencia de tercer orden: aparece en sistemas con memoria, y es relativamente dependiente de emergencias de segundo orden.

Empleando el lenguaje simbólico presentado, la definición de los distintos tipos de emergencia se puede expresar de la siguiente forma:

$$Emerg(x, y, v)_{t_{k-l}} =_{def}$$

1.  $\exists v S(v) \wedge \exists pq (N_A(p)_i \wedge N_A(q)_j \wedge (p, q)\pi v \wedge i < j)$
2.  $\exists xy [(Proc(x) \vee Prop(x) \vee Est(x) \vee Ob(x)) \wedge (y\pi N(p) \wedge Proc(y))]$
3.  $\exists z (E(z)_{t_{k-l}} \rightarrow (WF(x, y) \vee F_{mi}(x, y) \vee F_{mf}(x, y)))$
4.  $Emerg_d : \exists w (Proc(w)\pi N_A(p)_i \wedge x = w \wedge P(y, w))$
5.  $Emerg_f : x\pi N_A(q)_j \wedge (F_{mi}(x, y) \vee F_{mf}(x, y) \wedge C.D.(x, y))$

Las primeras tres cláusulas presentan el núcleo común a todos los tipos de emergencia. La primera dice que hay un sistema que posee al menos dos niveles distintos, y por tanto de altura distinta. La segunda indica que la entidad que emerge o bien es un proceso, o una propiedad, o una estructura, o un objeto, y que aquéllo respecto de lo que emerge es un proceso perteneciente a un determinado nivel. Por su parte, la tercera cláusula expresa

que la entidad emergente es dependiente (en alguno de los tres sentidos definidos<sup>22</sup>) de la entidad de la que emerge a partir del momento en que se da cierto estado del sistema.

La cláusula cuarta es exclusiva de la emergencia débil y afirma que hay un proceso en el nivel inferior que es idéntico a la entidad emergente. Además, el proceso respecto del que se suponía que emergía la nueva entidad (designado por  $y$ ), es parte impropia de ese proceso (es decir, que o bien son idénticos, o bien, al menos,  $y$  es parte de ese proceso). Esto no quiere decir sino que el proceso no era ontológicamente emergente, sino que simplemente existía un nombre para designar un proceso, o quizá un conjunto de procesos, ya conocidos en el nivel inferior.

La última cláusula es exclusiva de la emergencia fuerte. Expresa que efectivamente lo que emerge pertenece a un nivel superior respecto del proceso base, y que además lo emergente se fundamenta de manera mereológica funcional o mereológica fuerte respecto de su base. La última expresión,  $C.D.(x, y)$ , indica que entre lo emergente y el nivel inferior existe causación descendente. Esto obedece a la idea de que la emergencia fuerte está indisolublemente unida a la causación descendente y es, de hecho, su principal nota definitoria respecto de la emergencia débil, pues la irreductibilidad puede darse, aunque sea de forma aparente, también en esta versión de la emergencia. La idea de la estrecha relación entre ambos fenómenos, según lo que se ha estudiado a lo largo del capítulo, se muestra más que aceptable, pues cualquier entidad que esté conformada por entidades inferiores, por el mero hecho de ser, ya está modificando el comportamiento de sus componentes al influir en sus grados de libertad. Dicho de forma sintética: la causación descendente, una vez se tiene emergencia fuerte, no es una opción, sino la otra cara del fenómeno.

### **Causación descendente**

Según se ha establecido, una de las mejores formas de entender este tipo de causación para evitar incoherencias, es la siguiente: la estructura de un sistema, así como su dinámica, las cuales han emergido de los niveles inferiores, modifican el tamaño del espacio de estados del propio sistema. Esto quiere decir que algunos niveles superiores influyen en los inferiores mermando el alcance de su dinámica.

Este suceso se podría definir, haciendo uso de los conceptos presentados hasta ahora, así: la causación descendente es un fenómeno en el cual, una entidad emergente (propiedad, estructura o proceso), modifica el espacio de estados posibles del sistema en su conjunto. Expresado en el lenguaje simbólico desarrollado quedaría de la siguiente manera:

$$C.D.(x, y) =_{def} Emerg_f(x, y, z)_{t_{i-j}} \wedge F([Var(EE_p(y))_{t_{i-j}} < 0], x)$$

---

<sup>22</sup>Si se trata de emergencia débil, el sentido de fundamentación que se hará verdadero en la disyunción será, por tanto  $WF$ . Esto encaja con el hecho de que, como se ve en la cláusula cuarta y se explica a continuación, haya un proceso  $w$  en el nivel inferior que es idéntico con el proceso emergente débil  $x$ , y que la base sea parte impropia de ese proceso, pues:  $((Pyw \wedge x = w) \rightarrow Pyx) \wedge (Pyx \rightarrow WFxy)$

Es decir<sup>23</sup>, que hay causación descendente por parte de una emergencia fuerte  $x$  sobre una entidad  $y$ , si la existencia de una variación negativa (o dicho de otra forma: una disminución) en el espacio de estados posibles de la entidad  $y$  depende de esa emergencia fuerte. La variación del espacio de estados posibles se representa mediante una noción auxiliar:

$$\text{Var}(EE_p(x)_{t_{i-j}} = \text{Card}(EE_p(x)_{t_j}) - \text{Card}(EE_p(x)_{t_i})$$

Es decir, que la variación del espacio de estados posibles de un sistema en un determinado periodo de tiempo  $i - j$  consiste en la diferencia de los cardinales de dicho conjunto en los instantes inicial y final del periodo. Según sea el resultado de esta diferencia, la variación resultará creciente, menguante o estática:

- $\text{Var}(EE_p(x)_{t_{i-j}} =$ 
  - $> 0 \rightarrow$  *creciente*
  - $< 0 \rightarrow$  *menguante*
  - $= 0 \rightarrow$  *estática*

### Autorregulación

La idea básica de la autorregulación es la selección de ciertos estados posibles del sistema y el consiguiente confinamiento del sistema dentro de dichas regiones del espacio. Siguiendo el esquema propuesto más arriba (ver 8.2.2), se puede afirmar que la autorregulación consta de las siguientes partes:

- Mecanismo de variación: es el proceso o conjunto de procesos que dan lugar a los estados posibles, o puntos de interacción que definen estados posibles, sobre los que luego se llevará a cabo la selección. Ejemplos: cambios en el entorno y mutaciones genéticas. El procesamiento de información, que suele considerarse muy importante

---

<sup>23</sup>Dos precisiones acerca de la fórmula:

En primer lugar, dado que  $x$  emerge respecto de  $y$ , cabría pensar que el uso de  $F$  supondría una violación de los axiomas, al menos cuando se diera el caso de que  $y$  es parte de  $x$ . Sin embargo, la variación del espacio de estados posibles de  $y$  es más bien un concepto de segundo grado (por derivar del cardinal de un conjunto), y por tanto no parece que esté en relación mereológica alguna respecto de  $x$  o de  $y$ . De hecho, no parece que se pueda colocar siquiera en ninguno de los niveles del sistema, sino que es más bien fruto de una operación de abstracción al estudiar el sistema desde fuera.

En segundo lugar, se está asumiendo que el caso más común es aquél en el que se reduce el tamaño del espacio de estados, pero quizá no fuera prudente rechazar de pleno el caso contrario (un aumento de las posibilidades). Quizá esto pudiera darse en un caso en el que la emergencia fuerte no solamente afecta a las partes de las que está compuesta, sino también a otras entidades que pueblen el nivel inferior. Esto debería suceder de forma indirecta, si a través de la influencia sobre sus partes cambiara la forma de ser de otros objetos relacionados con ellas, pero que no sean partes de la entidad emergente, pues de lo contrario supondría una violación del cierre causal.

en los sistemas complejos, también puede tomarse como un mecanismo de este tipo, pues no es sino un proceso cuyo resultado ofrece variación en un nivel superior (en los casos más complicados podría hablarse de cognición, en otros más simples, quizá sólo «mapeo») sobre la cual el sistema llevará a cabo selecciones (cambio de conducta, aprendizaje, etc.).

- Mecanismo de selección: es el fenómeno que da lugar a la reducción del espacio de estados posibles propiamente dicha. En algunos casos, como el mencionado del termostato, o los pilotos automáticos en los que se fija una ruta, la selección es llevada a cabo por un agente externo: se fijan ciertos valores, y el sistema se encarga de mantenerlos por sí mismo. En otros casos, la merma del espacio de estados posibles proviene de la causación descendente, la cual es producto de la emergencia fuerte, que a su vez es originada por la dinámica del sistema. La selección, por tanto, es dependiente del propio sistema.
- Mecanismo de transmisión: una vez que se ha llevado a cabo la selección, los valores seleccionados han de permanecer en el sistema para que puedan influir en la dinámica de éste. En los sistemas más simples, puede que esto se consiga con una configuración de las piezas; en los más complejos, intervienen fenómenos tales como los bucles de realimentación, la memoria, el ADN, etc.
- Intercambio de materia y energía: es un proceso que no se menciona en el esquema original, y que puede considerarse exclusivo de los sistemas *autopoieticos*. Sin embargo, se trata de una característica que ha de añadirse si se pretende abarcar y diferenciar la mayor cantidad de sistemas dinámicos posibles, y en especial, si se quiere definir la complejidad. Se puede considerar que es un fenómeno que atraviesa todos los demás. Por ejemplo, en los organismos dotados de ADN, el cual se encuentra en el núcleo de las células, todas estas estructuras provienen de la asimilación de materia exterior al sistema; estas estructuras son mecanismos de transmisión que dependen, por tanto, de la asimilación de materia ajena. Pero además, las estructuras emergentes aparecen también gracias a la incorporación de material externo, y son estas estructuras las que permiten la causación descendente, y por tanto la autorregulación. Se puede considerar, por tanto, que en ciertos sistemas todos o gran parte de sus mecanismos de autorregulación dependen de la apertura a la materia y la energía del propio sistema.

Se ha mencionado que en ocasiones la selección de los estados se lleva a cabo por un agente externo, aunque después sea el propio sistema el encargado de mantenerse en el rango de valores establecido. En otros casos, por el contrario, la selección se lleva a cabo debido a las dinámicas del propio sistema. Cabe, por tanto, llevar a cabo una distinción entre autorregulación relativa y autorregulación fuerte. Esta distinción puede considerarse similar a la propuesta por Bertalanffy (sistemas abiertos / sistemas cerrados) o Maturana

y Varela (sistemas *autopoiéticos* / sistemas *alopoiéticos*), pero centrada en un aspecto diferente: si el origen de la selección es interno o externo. De esta forma se trata de evitar basar la distinción en conceptos problemáticos como el de procesamiento de información, tan difíciles de definir de forma exacta para todo tipo de sistemas.

Un sistema autorregulado se definiría simbólicamente así:

- $Auto(y) =_{def} \exists ypqrs([S(y) \wedge Var(p, y) \wedge Sel(q, y) \wedge Trans(r, y)] \vee Im(s, y))$ , donde cada uno de los componentes se define de la siguiente forma:
- $Var(p, y) =_{def} \exists py(Din(p) \wedge S(y) \wedge F([Var(EE_p(y)_{t_{i-j}} > 0], p))$
- $Sel(q, y) =_{def} \exists qyz(Emerg_f(q, z, y) \wedge F([Var(EE_p(y)_{t_{k-l}} < 0], C.D.(q, y)))$
- $Trans(r, y) =_{def} \exists r(F(Card(EE_p(y)_{t_{m-n}}, r) \wedge (Proc(r) \vee Est(r)))$
- $Im(s, y) =_{def} \exists suv(Proc_\alpha(u) \wedge Proc_\beta(v) \wedge (u, v)\pi Din(s) \wedge P(s, y))$
- Cumpliéndose las siguientes condiciones: 1)  $i < k < m$ , 2)  $j < l < n$

Un sistema  $y$  será autorregulado si posee un mecanismo de variación, uno de selección y uno de transmisión. De forma opcional puede poseer además un mecanismo de intercambio de materia y energía, lo cual haría que se considerase un sistema *autopoiético*.

El mecanismo de variación consiste en una dinámica (que puede pertenecer al sistema o no, o en parte sí y en parte no, y por ello no se especifica su pertenencia) de la que depende una ampliación del espacio de estados posibles del sistema.

El mecanismo de selección es una emergencia fuerte que produce una causación descendente que mengua el espacio de estados posibles. Este es, por supuesto, el mecanismo de selección que se da en un sistema autorregulado fuertemente. En un sistema relativamente autorregulado, en el que la selección de los estados posibles proviene de un agente externo, habría que emplear la siguiente notación:  $Sel_r(q, y) =_{def} F([Var(EE_p(y)_{t_{k-l}} < 0], agencia - externa))$ . Ambos tipos de sistemas se pueden designar así: sistema autorregulado fuerte ( $Auto_f(y)$ ); sistema autorregulado relativamente ( $Auto_r(y)$ ).

El mecanismo de transmisión hace que el cardinal del espacio de estados posibles (esto es, su tamaño) se mantenga durante un cierto periodo temporal debido a algún proceso o estructura.

El intercambio de materia consiste en dos tipos o especies de procesos que pertenecen a la dinámica global del sistema, uno de los cuales introduce nuevas partes en el sistema, que serán asimiladas, y otro de las cuales expulsa o elimina partes.<sup>24</sup>

La última condición significa que la variación precede a la selección, y ésta va antes que la transmisión. Todo esto, por supuesto, relativamente a un determinado proceso

<sup>24</sup>Para una definición completa de este fenómeno, podría resultar interesante definir ambos procesos en términos mereológicos, como agregadores de partes o eliminadores de partes, definiendo, por ejemplo, la varianza del total de partes del sistema.

autorregulatorio (un sistema puede poseer varios) y a una determinada cadena causal. Es decir, que cierto proceso regula el comportamiento del sistema en un periodo de tiempo, y más tarde puede volver a empezar, provocando otros cambios en el sistema, comenzando otra cadena causal en la que estas precedencias temporales, por decirlo así, se reiniciarían.

Es necesario realizar una aclaración orientada al análisis de sistemas concretos. Si bien es cierto que este esquema general propuesto en la definición parece poder identificarse en muchos de los casos de sistemas autorregulados, es posible que no siempre resulte útil, informativo o práctico identificar cada uno de los elementos de variación, selección, transmisión, etc. a la hora de describir la ontología de un sistema. Por ejemplo, en la mayoría de casos de sistemas artificiales, e incluso en muchos sistemas biológicos que no se estén examinando desde el punto de vista evolutivo, sino simplemente desde el funcional, puede que lo más importante sea la identificación de los bucles que hacen que el estado pasado del sistema influya en el estado futuro, y que podrían enmarcarse dentro del apartado de transmisión, como ya se ha sugerido. En los sistemas fuertemente autorregulados, se observará que estos bucles son fruto de la emergencia fuerte y su respectiva causación descendente, y en los sistemas autorregulados relativamente, será fruto de un acto externo de selección. A lo largo de los análisis del siguiente capítulo podrán observarse estos fenómenos.

### **Sistema Complejo**

Una vez descritas y definidas de manera rigurosa las características que todo sistema complejo parece, en principio, poseer, se pueden presentar de forma compacta para ofrecer una definición general de sistema complejo. Debido a que parece haber –al menos en primera instancia– sistemas que, compartiendo todas o casi todas las demás características descritas, no parecen exhibir intercambio de materia con el medio, resulta pertinente dividir los sistemas complejos en, al menos, dos grados. Pues si bien es cierto que, para algunos, la genuina complejidad reside en los sistemas que se autoconstituyen, una definición que sólo abarcara este tipo de sistemas dejaría fuera una gran cantidad de entidades que comparten con ellos no sólo ciertas características, sino también los problemas asociados a ellas (no linealidad, gran cantidad de elementos en interacción, imposibilidad de predicción, autorregulación, etc.), y que por tanto, también merecen un espacio en un estudio dedicado a la ontología de la complejidad. Las definiciones podrían tener la siguiente forma:

Sistemas complejos de primer grado:

$$S.C.1^o(x) =_{def} S(x) \wedge Auto_r(x)$$

Sistemas complejos de segundo grado:

$$S.C.2^o(x) =_{def} S(x) \wedge Auto_f(x) \wedge \exists y(Im(y, x))$$

En la primera definición se han asociado los sistemas de primer grado a la autorregulación relativa a una agencia externa, y en la segunda definición se incluye la

*autopoiesis* además de la autorregulación fuerte. Esto puede generar dudas. Es cierto que todos los sistemas *autopoieticos* tienen una autorregulación fuerte; ahora bien: ¿pueden existir sistemas que se autorregulen de manera fuerte y no intercambien materia y energía con el medio?

Resulta, desde luego, difícil de imaginar un sistema que no se autoconstituya (y que por tanto, ha tenido que ser fabricado por un agente externo) y que a la vez se dote a sí mismo de sus propias metas, o regule de forma completa por sí mismo la manera en que se relacionan todas sus partes y procesos. Esto es así porque en el momento de su fabricación y diseño, se han puesto en él características que no han surgido de su interacción, a través de los milenios, con el entorno (como sucede con las especies animales), sino que se le han inoculado desde el comienzo.<sup>25</sup> De forma quizá provisional, entonces, se conviene en aceptar que la *autopoiesis* y la autorregulación fuerte son coextensivas.

## 8.4. Conclusiones y observaciones finales

La discusión acerca de las características más importantes de los sistemas complejos ha permitido ver lo siguiente:

En primer lugar, conviene tratar la polisemia de la emergencia a través de una distinción en grados. No parece que, en principio, se haya de determinar que todos los casos de emergencia son ontológicamente reducibles o no reducibles, sino que los diferentes sentidos o grados de la emergencia se adecuan mejor dependiendo de las circunstancias. Así, la emergencia en termodinámica, es decir, la aparición del calor, la temperatura, la entropía, etc., a partir de interacciones de miles de partículas, resulta reducible ontológicamente a través de la mecánica estadística; en cambio, en otros casos, como los sistemas autoorganizados (que a su vez tienen como base sistemas termodinámicos), esta emergencia no es reducible de ninguna forma.

Además, se ha tratado de ofrecer una respuesta a otro de los principales problemas de la emergencia: la falta de una definición positiva. Como señalaba Kim, afirmar que la emergencia es una conjunción de superveniencia (dependencia) y no reducibilidad funcional, aporta más bien poco a la comprensión ontológica del fenómeno. A través de las relaciones mereológicas y de fundamentación se ha ofrecido una definición de los distintos grados de la emergencia.

En cuanto a la causación descendente, se ha observado que una de sus principales lacras era la de la posibilidad de la violación del cierre causal. Por lo general, este problema depende de la interpretación de «causa» que se esté utilizando. Si se piensa en la causación descendente como una causa eficiente, se tiene que un nuevo tipo de entidad está influyendo, desde fuera, en el mundo físico, con los consiguientes problemas para las leyes de conservación. Sin embargo, al interpretar la causación descendente a través del

---

<sup>25</sup>Este debate, por supuesto, debido a su magnitud, sólo puede ser tratado en este capítulo con unas breves pinceladas.

concepto de condiciones de frontera, este problema desaparece, pues es la estructura del propio sistema, y no una entidad ajena de un tipo nuevo, la que reduce el espacio de estados posibles del sistema, modificando su comportamiento.

Por su parte, la autorregulación se ha tratado de describir descomponiéndola en lo que parecen sus mecanismos básicos: variación, selección y transmisión. Estos procesos se han descrito en términos de otros fenómenos ya conocidos: la selección se puede ver como el efecto de las condiciones de frontera, la transmisión puede consistir en bucles de realimentación o estructuras más complejas como el ADN, la variación se entiende en términos de ampliación del espacio de estados posibles, etc.

A continuación, utilizando las nociones mereológicas y de fundamentación presentadas en otros capítulos, así como algunos de los añadidos y nociones auxiliares que se creyeron necesarios, se han construido definiciones formales de las principales propiedades de la complejidad, partiendo de la base de una ontología con tres categorías básicas: objetos, propiedades y relaciones, las cuales se organizan en niveles.

Haciendo uso de todas estas nociones, por fin desarrolladas y clarificadas, se ha llegado finalmente a una definición de sistema complejo. Esta definición se basa en los conceptos de sistema dinámico y autorregulación, la cual implica, en su versión fuerte, las nociones de emergencia fuerte y causación descendente, conceptos que han sido considerados los otros dos pilares de los sistemas complejos. Se ha creído conveniente distinguir dos sentidos de sistema complejo, uno abarcando todos los sistemas que se construyen a sí mismos a través del intercambio de materia y energía con el medio (denominados *autopoiéticos* por algunos autores), y otro, más débil, que comprende los sistemas que se autorregulan relativamente, simplemente tomando cierta información del medio.

# Capítulo 9

## Estudio de los sistemas complejos: casos prácticos

En este capítulo se va a tratar de aplicar el aparato formal desarrollado en las secciones anteriores a ejemplos concretos de sistemas. Esto se hace con el objetivo de estudiar en detalle todas las propiedades y fenómenos implicados en la complejidad sobre las cuales se ha debatido a lo largo de la tesis. De esta manera, se podrá comprobar de una forma rigurosa si las conclusiones alcanzadas son válidas en general para dichas propiedades y fenómenos. Además, se pondrá a prueba la utilidad como herramienta de análisis del lenguaje ontológico desarrollado en la sección «Un formalismo de la complejidad».<sup>1</sup>

Antes de comenzar a analizar sistemas complejos como tales, se llevarán a cabo algunos estudios previos. En primer lugar, la sección inicial estará dedicada al análisis de un sistema sencillo (un péndulo) para familiarizarse con el análisis ontológico de los sistemas. En las secciones siguientes se analizarán distintos sistemas que poseen de forma reseñable alguna de las características atribuidas a los sistemas complejos, sean del grado que sean. Tras esto, se estará en posesión de un análisis individual de cada una de estas características, el cual será empleado en la sección final del capítulo, dedicada al estudio de un sistema complejo de forma completa.

### 9.1. Un sistema sencillo

Tal y como se ha visto en la descripción de Crutchfield y col. 1995, pág. 38 y puede observarse también en *Dinámica de sistemas* (Ogata 1987, pág. 75), un péndulo puede considerarse como un sistema compuesto de tres elementos: hilo, pesa y soporte. La pesa se balancea gracias a que está unida al soporte a través del hilo. Despreciando el rozamiento y la masa del hilo, se han de tener en cuenta, simplemente:

- Tres objetos: hilo, pesa, soporte ( $h, p, s$ )

---

<sup>1</sup>Ver sección 8.3.

- Dos propiedades: la masa de la pesa, la longitud del hilo ( $M, L$ )
- Dos relaciones: la pesa está atada al soporte mediante el hilo, lo cual supone la estructura básica,  $R(h, p, s)$ , y el ángulo del hilo respecto de un eje vertical imaginario, representando la posición espacial relativa de los tres objetos,  $A(h, p, s)$ <sup>2</sup>

Desde el punto de vista del movimiento pendular, lo ontológicamente relevante para el análisis del sistema sería lo siguiente:

- El péndulo es un sistema compuesto por tres elementos
- Además, el péndulo posee una cierta estructura.
- Esta estructura permite el proceso del movimiento pendular descrito por las ecuaciones (descritas en Ogata 1987, pág. 75 y vistas en la sección 8.2.1).
- Este análisis puede llevarse a cabo, a efectos de la comprensión del movimiento pendular, teniendo en cuenta un único nivel, en el que se encuentren los componentes del péndulo (hilo, pesa y soporte).<sup>3</sup>

Expuesto en en lenguaje formal de la ontología de sistemas:

- Componentes básicos:
  - $Ob(h, p, s)$ . Para referirse a estos objetos de forma grupal y abreviada puede usarse la expresión  $O_{1-3}$ , por ejemplo.
  - $Prop(M, L)$ , abreviado,  $P_{1-2}$ . Además,  $M(p)$  y  $L(h)$ .
  - $Rel(R, A)$ , o  $R_{1-2}$ . Y además, como se ha dicho más arriba,  $R(h, p, s)$  y  $A(h, p, s)$ .
- Entidades superiores:
  - El movimiento pendular, el cual es un proceso en el que intervienen los componentes básicos en una sucesión de tiempo, y que consiste básicamente en el cambio de posición relativa de los objetos:  $Proc(mov)$ , siendo  $mov(O_{1-3}, P_{1-2}, R, A_{t_{i-j}})$ . Sólo se coloca subíndice en la relación del ángulo pues es aquella cuyo cambio define el movimiento pendular, considerándose las demás fijas. Es decir, a través de los diferentes estados  $E(O_{1-3}, P_{1-2}, R_{1-2})_{t_{i-j}}$ , sería  $A$  lo único que cambiaría. De hecho, si  $R, M, L, h, p$ , o  $s$  cambiaran o desaparecieran, o bien no habría movimiento pendular, o bien sería distinto (variando su velocidad, por ejemplo).

<sup>2</sup>Para facilitar la lectura, y como es habitual, se han designado los objetos con letras minúsculas, y las propiedades y las relaciones con mayúsculas, pero no es algo que se considere totalmente necesario.

<sup>3</sup>Es decir, que no resultaría relevante, por ejemplo, el nivel químico de los componentes del péndulo. Para describir su movimiento, simplemente se tienen en cuenta propiedades como masa, longitud, ángulo que forma el hilo respecto del eje vertical, etc.

- Además, de entre todas las entidades del sistema, puede observarse que  $R$  posee un papel especial: pueden estar todos los objetos presentes, pero si no se da la estructura básica en la que la pesa está unida al soporte por el hilo, no puede darse  $A$ , ni por tanto su cambio, ni por tanto el movimiento pendular, por lo que se podría decir que  $Est(O_{1-3}, P_{1-2}, R)$  (en adelante:  $est\_bas$ ), cumpliéndose lo que reza la definición de estructura: un conjunto de (OPR) que permite la existencia (en este caso en forma de fundamentación intermedia o funcional) de un proceso, aquí denominado  $mov$ .
- El propio péndulo, que de forma sintética se puede expresar, a través de la matriz sistémica, así:

$$S(pend) = \begin{pmatrix} Ob(h, p, s) \\ Prop(M, L) \\ Rel(R, A) \\ Est(est\_bas) \\ Proc(mov) \end{pmatrix}$$

- La matriz, junto con la siguiente tabla, que sintetiza las relaciones ontológicas entre las entidades que se expresan en la matriz, se podría considerar como el resumen de toda la ontología relevante del sistema:

$M(p)$
$L(h)$
$R(h, p, s)$
$T(h, p, s)$
$est\_bas(O_{1-3}, P_{1-2}, R)$
$F_i(mov, est\_bas)$

Se comprueba que la definición ofrecida de sistema encaja con el caso presentado: el péndulo es un conjunto de (OPR), que posee un proceso y una estructura, así como una dinámica que describe su cambio.

Puede verse, por tanto, que una de las posibles maneras de describir la ontología de un sistema es la siguiente: primero, se identifican las entidades relevantes, tratando de distinguir su tipo; a continuación, se les asigna un nombre; en tercer lugar, se trata de esclarecer las relaciones y dependencias que existen entre dichas entidades; por último, pueden expresarse las dos partes principales del análisis (entidades y dependencias) a través de la matriz sistémica junto con una tabla de dependencias. A continuación se aplicará este mismo tipo de análisis a algunos fenómenos y entidades más complicados, algunos de los cuales implicarán el uso de niveles.

## 9.2. Autorregulación relativa: sistemas de control

Una gran fuente de ejemplos de sistemas que se autorregulan relativamente se puede encontrar en la rama de la ingeniería denominada «ingeniería de sistemas de control». Un sistema de control puede considerarse «aquél sistema que ante unos objetivos determinados responde con una serie de actuaciones.» (Ñeco García 2013, pág. 4) Es decir, que el sistema queda ajustado según unos parámetros determinados, y a lo largo del tiempo, trata de mantenerse en ese estado predefinido, dado que posee mecanismos que le permiten comparar su estado actual con el estado deseado, así como otros ingenios que provocan que la diferencia entre esos valores se mantenga mínima, es decir, le permiten actuar para cambiar.

A grandes rasgos, los elementos de un sistema de control son los siguientes: (Ñeco García 2013, pág. 5; Paz 2011, págs. 22-23)

- Señal de salida: la variable que se desea controlar
- Planta o sistema: el conjunto de elementos que lleva a cabo una función determinada
- Sensor: elemento que permite medir la variable de salida
- Señal de referencia: el valor que se quiere que tenga la variable de salida
- Actuador: elemento que actúa sobre el sistema para alcanzar la señal de referencia
- Controlador: elemento que dirige al actuador en función de la señal de referencia

Se suelen distinguir al menos dos tipos de sistemas de control: de lazo abierto y de lazo cerrado. (Ñeco García 2013, págs. 6-7; Paz 2011, págs. 24-25) En los sistemas de lazo abierto, la señal de salida no influye en la acción de control. Un ejemplo típico sería una lavadora, que funciona con programas. Independientemente del estado de la ropa, la máquina, transcurrido el tiempo del programa, se detiene y permite sacar las prendas. Posee una entrada (la ropa sucia), una salida (ropa generalmente limpia) y una planta (los mecanismos y el programa elegido).

Por otra parte, están los sistemas de lazo cerrado, los cuales interesan especialmente, como se verá a continuación. En estos sistemas, existen bucles de realimentación (o retroalimentación) que implican a la señal de salida. «En este tipo de sistemas se compara la variable a controlar con la señal de referencia de forma que en función de esta diferencia entre una y otra, el controlador modifica la acción de control sobre los actuadores de la planta o sistema.» (Ñeco García 2013, pág. 6) Es decir, que la salida puede influir en la entrada en orden a mantener ciertos valores prefijados.

A través del análisis del siguiente ejemplo de sistema de control se tratará de elucidar estas ideas, con vistas a obtener un esquema general de la ontología de la autorregulación relativa que sea aplicable al estudio de los sistemas complejos. Se trata de casos de autorregulación relativa según las definiciones anteriormente ofrecidas, pues las variables a

mantener no emanan de la propia configuración del sistema, sino que se obtienen de forma externa. Asimismo, los casos de fundamentación que se encontrarán serán eminentemente intermedios o funcionales.

Un sistema de control de temperatura de un horno eléctrico es un ejemplo de sistema de control relativamente sencillo:

La temperatura se mide con un termómetro, el cual es un dispositivo analógico, esta medición se convierte en datos digitales mediante un convertidor analógico-digital (convertidor A/D), este dato digital se introduce en el controlador a través de una interfaz, se compara con la temperatura programada o deseada y si hay una diferencia, el controlador (computador) envía una señal al calefactor a través de una interfaz, al amplificador y relé para que la temperatura disminuya o aumente según sea el caso, a la temperatura deseada. La salida del sistema es la temperatura, el controlador es el computador y la entrada es la señal del termómetro. (Paz 2011, pág. 22)<sup>4</sup> y <sup>5</sup>

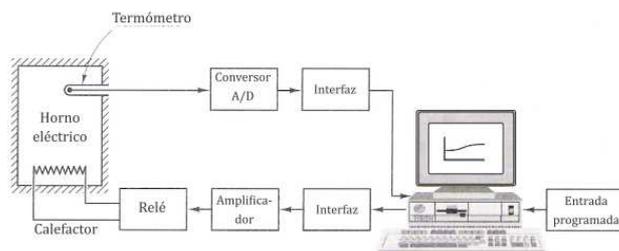


Figura 9.1: Esquema de un sistema de control de temperatura

Se tienen entonces los siguientes elementos relevantes para la ontología<sup>6</sup>:

- Objetos: horno, programa, relé, calefactor y termómetro.  $Ob(h, p, r, c, t)$ . Abreviado:  $O_{1-5}$
- Propiedades: temperatura del termómetro, temperatura del calefactor, apertura del relé, entrada programada.  $Prop(T_t, T_c, A_r, E_p)$ . Abreviado:  $P_{1-4}$
- Relaciones: estar el termómetro conectado al horno y al programa, estar el programa conectado al relé, el calefactor y el horno.  $Rel(R_1, R_2)$ . Además:  $R_1(t, h, p)$  y  $R_2(p, r, c, h)$ . Abreviado:  $R_{1-2}$
- Estructuras: el orden concreto de las dos relaciones anteriores conforma la estructura que permitirá llevar a cabo los procesos principales. Que el termómetro lleve la

<sup>4</sup>Existe una descripción similar en Ogata 1987, págs. 4-5

<sup>5</sup>La figura 9.1 muestra esta disposición de componentes. Imagen extraída de Paz 2011, pág. 22

<sup>6</sup>Se obvian convertidores e interfaces, pues son relevantes desde el punto de vista ingenieril más que desde el ontológico.

información al programa permite hacer la comparación, y que el programa a su vez se comuniquen con el relé y el calefactor, permite la actuación. El encadenamiento concreto de estos objetos y relaciones es necesario para llevar a cabo el fin deseado, la regulación de la temperatura del horno.  $est\_bas(O_{1-5}, P_{1-4}, R_{1-2})$

- Procesos: medición de la temperatura del horno, comparación de la temperatura del horno con la entrada programada, modificación del relé-aumento/disminución de la temperatura del calefactor.  $Proc(proc_m, proc_c, proc_mod)$ . Abreviado:  $Proc_{1-3}$
- La matriz sistémica:

$$S(control\_horno) = \begin{pmatrix} Ob(h, p, r, c, t) \\ Prop(T_t, T_c, A_r, E_p) \\ Rel(R_1, R_2) \\ Est(est\_bas) \\ Proc(proc_m, proc_c, proc_mod) \end{pmatrix}$$

- Tabla de dependencias:

$T_t(t)$
$T_c(c)$
$E_p(p)$
$R_1(t, h, p)$
$R_2(p, r, c, h)$
$est\_bas(O_{1-5}, P_{1-4}, R_{1-2})$
$F_i(proc_m, est\_bas)$
$F_i(proc_c, est\_bas)$
$F_i(proc_mod, est\_bas)$
$F_i(T_{t+1}, T_{c_t})$

Puede considerarse un único nivel amplio para todos los componentes. El sentido de la fórmula  $F_i(T_{t+1}, T_{c_t})$  es el siguiente: el valor de la entrada (la temperatura del termómetro) en un momento dado depende del valor de la salida (temperatura del calefactor) en el momento anterior. Y es que, en general, esta parece ser la característica clave de los sistemas realimentados<sup>7</sup>: que la entrada depende funcionalmente del valor de la salida en un momento anterior. Esto es así porque un comparador enfrenta ambos valores, y el control modifica el actuador en consecuencia.<sup>8</sup>

<sup>7</sup>Se están tratando hasta ahora, y se seguirá haciendo, sistemas con una sola entrada y una sola salida. Los sistemas con múltiples entradas y salidas también poseen esta característica, pero dada su complejidad, sería más difícil de expresar.

<sup>8</sup>En este caso, a modo de simplificación, se ha considerado que el objeto «programa» contiene el control y el comparador.

Haciendo uso del esquema matriz sistémica / tabla de dependencias, se puede tratar de describir la estructura ontológica general de un sistema realimentado, para así poder compararla con la estructura general de la autorregulación débil o relativa, tal y como se expresa en la definición anteriormente presentada. Se supone que un sistema realimentado simple posee en general la forma que se observa en la figura 9.2.<sup>9</sup>

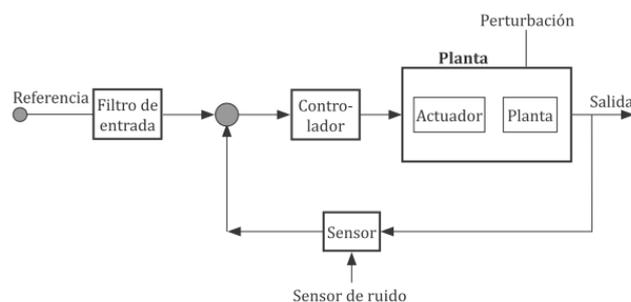


Figura 9.2: Esquema general de un sistema realimentado

Dejando a un lado el ruido y las perturbaciones, el funcionamiento es el siguiente: la entrada o referencia entra en el sistema y se compara (el comparador se representa como un punto gris en la entrada) con el valor de salida, en función del resultado de la comparación, el controlador manipula el actuador de una forma u otra, modificando el estado de la planta, y por tanto el valor de salida, que vuelve a ser comparado con la entrada. Los elementos podrían ser, por tanto:

- Objetos: filtro de entrada, comparador, controlador, actuador, planta, sensor.  
 $Ob(f, comp, cont, a, p, s)$
- Propiedades: entrada, salida.  $Prop(E, S)$ <sup>10</sup>
- Relaciones:  $R_1(f, comp, cont, a, p)$  y  $R_2(p, s, comp)$ <sup>11</sup>
- Estructuras: en este tipo de sistemas sencillos no suele ser necesario distinguir entre varias estructuras, de modo que se puede emplear en general la denominación *est\_bas* para referirse al orden específico de los objetos, propiedades y relaciones que hacen posibles los procesos.

<sup>9</sup>Figura extraída de Paz 2011, pág. 26

<sup>10</sup>Como ya se ha hecho en los ejemplos anteriores, se puede considerar la entrada y la salida como propiedades y/o modificaciones de sensores y filtros, pues en la mayoría de los casos rara vez son objetos, sino más bien velocidades, flujos de líquido o aire, temperaturas, etc.

<sup>11</sup>También, como se ha visto en los ejemplos, puede resultar cómodo y explicativo dividir las relaciones en dos ramas principales: una que conecta la entrada con el comparador y la planta (por decirlo así, el camino de ida), y otra que conecta la salida con la planta y el comparador (el camino de vuelta), resaltando la diferencia entre los dos momentos principales de un sistema realimentado, y a la vez poniendo de relieve los nexos de unión de ambos momentos (la planta y el comparador).

- Procesos: a la hora de analizar los sistemas concretos, se suelen poder distinguir varios procesos encadenados, pero puede considerarse un proceso principal: el de modificar la acción del controlador según el resultado de la comparación (que en un análisis más fino, podría desgranarse en dos mediciones, una comparación, y una modificación del actuador).  $Proc(proc)$
- Matriz sistémica:

$$S(control\_velocidad) = \begin{pmatrix} Ob(f, comp, cont, a, p, s) \\ Prop(E, S) \\ Rel(R_1, R_2) \\ Est(est\_bas) \\ Proc(proc) \end{pmatrix}$$

- Tabla de dependencias:

$E(f)$
$S(s)$
$R_1(f, comp, cont, a, p)$
$R_2(p, s, comp)$
$est\_bas(O_{1-6}, P_{1-2}, R_{1-2})$
$F_i(E_{t+1}, S_t)$

Se puede observar la misma forma general que en el ejemplo estudiado: una estructura permite unos procesos que provocan una dependencia funcional de la entrada respecto de la salida en un tiempo anterior. Esta característica puede expresarse con el enunciado

$$[\exists xywvES(Est(x) \wedge Proc(y) \wedge Ob(w, v) \wedge Prop(E, S)) \wedge (F_i(y, x) \wedge E(w) \wedge S(v))] \rightarrow F_i(E_{t+1}, S_t)$$

que quiere decir que la dependencia funcional de dos propiedades (nombradas  $E$  y  $S$  por «entrada» y «salida»), en la que una depende del estado anterior de la otra, es debido a la dependencia funcional que existe de un proceso respecto de una determinada estructura.

En cuanto a la génesis del mecanismo, si se compara este esquema con la definición de autorregulación, se puede establecer que la realimentación simple es un tipo de autorregulación en la que la selección no se lleva a cabo debido a dinámicas internas del propio sistema, sino que es programada externamente. Tampoco existe intercambio de materia y energía con el medio, de forma que el sistema se autoconstituya. Sin embargo, sí existen los mecanismos de variación (los valores de entrada varían) y de transmisión (el valor seleccionado se mantiene a lo largo del tiempo). En lo referente al funcionamiento del sistema, se puede observar el bucle característico, en el que el producto de un proceso influye en sí mismo en resultados sucesivos.

### 9.3. Autorregulación fuerte: percepción del *quorum*

En el campo de los sistemas biológicos pueden encontrarse multitud de ejemplos de autorregulación. En estos casos, además, puede hablarse de autorregulación fuerte, dado que los mecanismos han surgido por selección natural, y por tanto los valores a los que tienden (que suelen ser variables según las circunstancias, pero dentro de un rango determinado) no han sido determinados por un agente inteligente externo. Además, a través del metabolismo, los entes biológicos se constituyen a sí mismos, tomando materia del exterior.

Resultaría imposible, dados los propósitos de esta sección, abarcar fenómenos tan complicados y generales como la morfogénesis de un animal o el metabolismo de un organismo pluricelular. Sin embargo, puede que algunas partes de procesos concretos a nivel microscópico sí sean abordables y ofrezcan alguna luz acerca de la autorregulación fuerte. Un ejemplo de este tipo de procesos o mecanismos lo tenemos en la denominada «percepción del *quorum*» (*quorum sensing*), un proceso a través del cual algunas entidades biológicas son capaces de comunicarse entre sí con el fin de alterar su comportamiento o genoma cuando se ha alcanzado un determinado número de individuos. Pese a que esta comunicación se ha observado incluso en algunos insectos (Gargaud, Amils y Cleaves 2011, pág. 1397), el ejemplo presentado estará centrado en el caso de las bacterias. En las bacterias, esta percepción del *quorum* funciona de la siguiente manera:

Se trata de un fenómeno por el cual las bacterias determinan su propia densidad poblacional a través de una serie de moléculas sensoras, a veces denominadas autoinductoras, ya que pueden incluso estimular a la propia célula que las liberó. La concentración de estas moléculas señales se incrementa conforme aumenta la población hasta que alcanza un determinado nivel, indicando a las bacterias que la población ha alcanzado un nivel crítico o *quorum*. Entonces, las bacterias comienzan a expresar una serie de genes dependientes del *quorum*. (Prescott, Harley y Klein 2004, pág. 141)

El esquema general que siguen las bacterias que hacen uso de estos mecanismos es el siguiente:

se alcanza cierta densidad celular → aumenta la concentración de moléculas señal → cambia la expresión genética

Esto hace que, por ejemplo, bacterias patógenas como la *Pseudomonas aeruginosa* sepan en qué momento deben volverse virulentas, ya que han alcanzado un número considerable y tienen más probabilidades de vencer al sistema inmune del huésped. Esta bacteria posee, al menos, cuatro sistemas de percepción del *quorum* conocidos (Lee y Zhang 2015).

En el caso de la bacteria *Vibrio fischeri*, estos mecanismos de comunicación son algo más sencillos:

El gen *luxR* codifica la proteína LuxR, el cual es el activador transcripcional de genes de luminiscencia y en presencia de VAI, se une a una secuencia con simetría diada localizada aproximadamente a -40 pares de bases «upstream» (caja *luxR*) del operón de luminiscencia: *luxICDABEG*. El primer gen de este operón, *luxI*, codifica para la proteína VAI sintetasa [...] responsable de la síntesis de VAI. A baja densidad celular, *luxI* se transcribe a nivel basal y VAI se acumula lentamente en el medio de crecimiento. Cuando VAI alcanza concentraciones críticas en el medio intracelular (a alta densidad celular), interactúa con LuxR; este complejo se une a la «caja *lux*» y activa la transcripción de genes de luminiscencia y su propia transcripción. Esto genera un esquema autorregulatorio positivo dependiendo de las concentraciones de VAI. (Arráiz 2001, pág. 3)

Los productos de los genes de la «caja *lux*», junto con otras sustancias químicas<sup>12</sup>, producen la emisión de luz. Se tienen entonces los siguientes elementos:

- Objetos
  - Nivel 1: se tienen las moléculas señal, las proteínas, genes y sustancias químicas. En concreto: *luxR* y *luxI* (genes); operón<sup>13</sup> *luxICDABEG* (conjunto de genes); LuxR (proteína); VAI<sup>14</sup> (molécula señal); VAI sintetasa (proteína).
  - Nivel 2: las bacterias que forman grupos, segregan VAI y contienen los genes.
- Propiedades:
  - Nivel 1: VAI es una señal, LuxR es un activador transcripcional.
  - Nivel 2: el resultado del proceso es luminiscente.
- Relaciones:
  - Nivel 1: dado que los genes codifican otra sustancia, conviene hacer uso de la relación «*x* – *codifica* – *y*». Además, las moléculas también pueden unirse y dar lugar a otras. En resumen: *luxR* codifica LuxR, y el operón *luxICDABEG* codifica, a través de *luxI* (y vía VAI sintetasa), la molécula VAI, y además, contiene los genes de luminiscencia que dan lugar a los productos químicos necesarios para generar luz; LuxR, en presencia de VAI, se une a la cadena que contiene el operón, permitiéndole llevar a cabo las operaciones que se acaban de mencionar.

---

<sup>12</sup>En concreto: «Light is emitted by bacteria living at high cell density in dedicated animal organs, as the result from a chemical reaction involving flavine mononucleotide and aldehydes and the products of the *lux* genes.» (Witzany 2010, pág. 340)

<sup>13</sup>«An operon is a group of genes whose products have related or complementary functions and which are transcribed as a unit.» (Gargaud, Amils y Cleaves 2011, pág. 1177)

<sup>14</sup>Un acrónimo de *vibrio autoinductor*

- Nivel 2: las bacterias se organizan en forma de colonia.
- Estructuras:
    - Nivel 1: aparte de, por supuesto, la determinada arquitectura de la bacteria, la forma que posee el operón permite que este codifique, además de las sustancias necesarias para la luminiscencia, el propio VAI, es decir, la molécula necesaria para que el propio operón entre en funcionamiento, creándose así un bucle autorregulado: el producto del proceso afecta al propio proceso.
  - Procesos:
    - Nivel 1: se podría dividir la aparición de luminiscencia en tres procesos principales: la generación de LuxR; la generación de VAI y de mecanismos luminiscentes; la unión de LuxR al operón en presencia de VAI.
    - Nivel 2: la segregación de VAI por parte de las bacterias, que hace que la concentración de esta sustancia en el medio aumente, haciendo posible el inicio de todo el proceso.
  - La matriz sistémica podría organizarse de la siguiente manera<sup>15</sup>:

$$S(\text{Vibrio\_fischeri}) = \begin{pmatrix} Ob(luxR, LuxR, luxI, VAI, operon, sust_q)\pi N_1 \\ Ob(bac)\pi N_2 \\ Prop(Se, At)\pi N_1 \\ Prop(Lu)\pi N_2 \\ Rel(Cod, Un_R)\pi N_1 \\ Rel(Col)\pi N_2 \\ Est(arq\_bac, est\_op)\pi N_1 \\ Proc(gener_1, gener_2, un\_proc)\pi N_1 \\ Proc(seg)\pi N_2 \end{pmatrix}$$

Esta bacteria se encuentra en la naturaleza dentro de los órganos de algunos animales marinos, siendo la responsable de la luminiscencia de estos seres, característica que les ayuda a atraer alimento. (Witzany 2010, págs. 340-341) Por tanto, el coste metabólico de producir la luz queda sufragado debido a la obtención de alimento, dotando así de sentido evolutivo al mecanismo. Esto quiere decir, entre otras cosas, que el análisis ontológico podría llevarse a niveles superiores (el animal huésped, el ecosistema del animal, etc.), pudiendo observar este pequeño sistema en su contexto original.

Puede observarse a través de todo el entramado un claro bucle de realimentación, dotando al conjunto de un comportamiento autorregulado. El producto del operón, el VAI,

<sup>15</sup>Resulta preferible, para evitar entorpecer la descripción y duplicar nombres sin razón suficiente, mantener los nombres originales de las moléculas pese a que en ocasiones algún objeto comience su nombre con mayúscula.

$Se(VAI)$ $At(LuxR)$
$Cod(luxR, LuxR)$ $Cod(luxI, VAI)$ $Cod(operon, sust_q)$ $Col(bac_{1-n})$
$est\_op([luxI, CDABEG], [At], [Un_R])$
$F(luxI_{t+1}, [VAI \wedge LuxR]_t)$ $F(VAI_{t+1}, luxI_t)$ $F_{mf}(Lu, [LuxR, VAI, operon])$

es necesario a su vez para el mantenimiento de la actividad del propio operón, dando así lugar a la expresión de los genes de luminiscencia, de forma que cuando la operación se ha llevado a cabo en un suficiente número de individuos, aparece el efecto de luminiscencia de manera grupal, en la colonia bacteriana. Además, y como parece ser necesario en la autorregulación fuerte, el sistema se ha generado a través de mecanismos de selección, variación y transmisión autónomos (selección natural y genética). El sistema en conjunto se mantiene gracias al intercambio de energía con el medio (alimentación y excreción), lo cual se clarifica cuando se tiene en cuenta que la colonia de bacterias se halla incorporada a un animal. Es por esto por lo que se ha indicado que los procesos y propiedades dependen unos de otros de forma fuerte ( $F$  y  $Fmf$ ).

#### 9.4. Emergencia débil: autómatas celulares

Los autómatas celulares, al menos en algunas de sus variantes, pueden ser buenos proveedores de ejemplos de emergencia débil. El campo de los autómatas celulares suele ser empleado para estudiar el comportamiento de sistemas compuestos de múltiples elementos que interactúan entre sí, y entre ellos, algunos sistemas complejos. (Wolfram 1984) En esencia, un autómata es un individuo insertado en un conjunto formado por otros como él, y cuyo estado cambia en función de tres cosas: su estado previo, el estado de sus vecinos y las reglas programadas.<sup>16</sup> Estos conjuntos son denominados redes de autómatas celulares, o redes celulares, y poseen los siguientes elementos y características (Benítez López 2013, págs. 1-4):

<sup>16</sup>The name CA [*cellular automata*] derives from the mathematical concept of automaton, a discrete-time system with a finite set of inputs I, a finite set of states S, a finite set of outputs O, a state transition function  $\varphi$  which gives the state at the next time step as a function of the current state and inputs, and an output function  $\eta$  which gives the current output as a function of the current state. In a CA each cell is thus an automaton which issues its state as output and takes as inputs the outputs of the cells in the cell's neighborhood. (Floreano y Mattiussi 2008, pág. 107)

- Espacio celular: es la forma en que se disponen los autómatas en la red. Es decir, la red puede ser unidimensional, bidimensional, tridimensional, etc. Además, estas redes tienen límites, que pueden ser de varios tipos, dependiendo de cómo se desea que se comporten los individuos que los componen. Por ejemplo, los límites pueden ser periódicos, de forma que el último autómata de la fila (suponiendo una red unidimensional) se relacione con el primero.
- Relaciones de vecindad: cada autómata puede tener en cuenta, a la hora de cambiar de estado, a todos o sólo algunos de sus vecinos. Si pensamos en la red como en una cuadrícula, y asumimos que sólo se tienen en cuenta (como es habitual) a los vecinos inmediatos (los que están en contacto con el autómata en cuestión), se puede ver que en una red unidimensional se tienen tres opciones: tener en cuenta al de la izquierda, al de la derecha o a los dos, que es la más habitual. En una red bidimensional, las relaciones más frecuentes son las siguientes: vecindad de Moore (tiene en cuenta a los ocho vecinos inmediatos) y vecindad de Von Neumann (tiene en cuenta sólo a cuatro vecinos, los que se encuentran delante, detrás y a los lados).
- Dinamismo: las reglas que determinan el comportamiento de cada autómata en función de su propio estado y el de los demás en el momento actual. Suponiendo autómatas que sólo pueden tener dos estados, una regla podría ser la siguiente: «si el estado en  $t$  es 1, y de entre los ocho vecinos, hay al menos cuatro con estado 1, el estado en  $t+1$  será 1.»

La forma más sencilla de red de autómatas celulares es la que se denomina «autómata celular elemental». En esta red, todos los autómatas son finitos (número de estados posibles finito) e iguales (definidos por la misma regla). Además, los autómatas trabajan en momentos discretos y de forma sincrónica, es decir, todos cambian de estado en  $t_1, t_2, t_3, \dots$ . Las relaciones de vecindad son las mismas para todos. Los límites del espacio son periódicos, dando lugar a círculos en el caso de redes unidimensionales, y toroides en el caso de redes bidimensionales. (Benítez López 2013, pág. 4)

El paradigma de autómata celular elemental posee una forma circular (una sola dimensión con límites periódicos) y una relación de vecindad de radio uno. Este tipo de autómatas es el que se tomará como modelo para ejemplificar el fenómeno de la emergencia débil. En la figura 9.3 puede verse un ejemplo de la evolución temporal de este tipo de sistemas<sup>17</sup>.

Cada fila representa el estado del sistema en un momento dado del tiempo. La fila inmediatamente inferior representa el estado en el momento siguiente, y aparece en función de una regla establecida y de los estados de los autómatas en la fila/momento anterior. De esta forma, con el paso del tiempo, pueden aparecer diferentes resultados, dependiendo de la regla escogida y de la configuración del estado inicial. El resultado puede ser aleatorio,

<sup>17</sup>Imagen tomada de Wolfram 2002, pág. 25

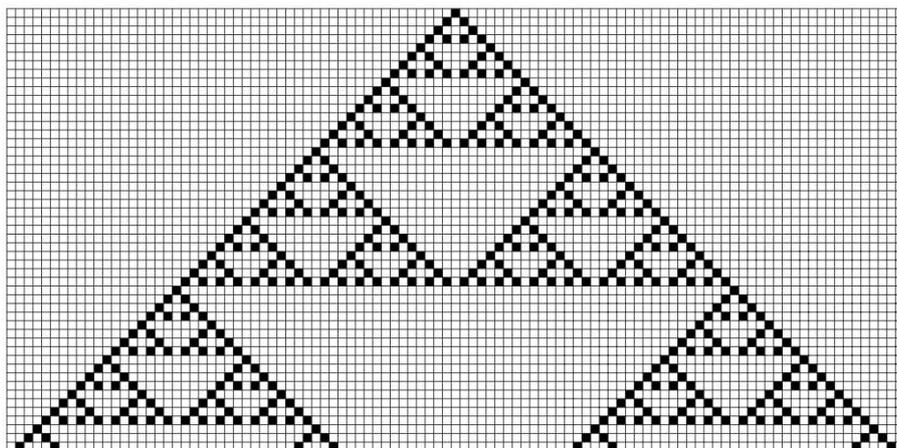


Figura 9.3: Evolución de un autómata celular

puede quedar totalmente vacío en pocos pasos, puede dar lugar a patrones muy ordenados o incluso a estructuras cíclicas. Una cuestión que suele plantearse es si estos patrones que aparecen con el paso del tiempo son emergencia en el sentido propio o fuerte, o bien son estructuras que resultan en cierto sentido sorprendentes o inesperadas, pero que, aun no siendo atribuibles a los elementos individuales, sí son por completo deducibles de las reglas preestablecidas. Para esclarecer el problema (que podría afectar, en principio, sólo a los autómatas celulares elementales, y así se tratará aquí) es necesario explicitar la ontología de este tipo de sistemas según la metodología establecida.

La matriz sistémica general para una red de autómatas celulares sería la siguiente:

$$S(AC) = \begin{pmatrix} Ob(\text{autómata}_1, \dots, \text{autómata}_n) \\ Prop(\text{estado}_1, \dots, \text{estado}_n) \\ Rel(\text{vecindad}) \\ Est(\text{espacio\_celular}) \\ Proc(\text{cambio\_estado}) \end{pmatrix}$$

Suponiendo un autómata celular elemental sencillo, con sólo seis individuos, dos estados, una regla, una dimensión, límites periódicos y relaciones de vecindad de radio 1 (por lo tanto, sólo afectan a los dos autómatas inmediatos), se tendría la siguiente matriz, con su correspondiente tabla de dependencias:

$$S(AC) = \begin{pmatrix} Ob(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6) \\ Prop(E_1, E_2) \\ Rel(Vec) \\ Est(círculo) \\ Proc(\text{cambio\_estado}) \end{pmatrix}$$

En este punto se estaría tentado de añadir en la matriz sistémica otra entidad llamada «estructura emergente», «patrón» o algo similar. Así, se habría de añadir en la

$E_1(a_{1-6}) \vee E_2(a_{1-6})$
$Vec(a_1, a_2) \wedge Vec(a_2, a_3) \wedge Vec(a_3, a_4) \wedge \dots$
$cambio\_estado(a_{1-6}, Vec)$

tabla de dependencias una última línea indicando que ese patrón depende del proceso *cambio\_estado* (que está guiado por la regla que define el comportamiento de los autómatas). Sin embargo, puede que esto no sea en absoluto necesario, al menos a nivel ontológico. Las razones son las siguientes:

En primer lugar, si existiera una emergencia fuerte, se podrían diferenciar al menos dos niveles, y el superior habría de ser susceptible de modificar el espacio de estados del inferior. Es decir, podría haber causación descendente. El problema es que, aunque a nivel explicativo o descriptivo se pueda hablar de patrón o dibujo emergente, realmente el patrón no es sino la regla en acción, mostrada en una sucesión de tiempo. No es que no sea posible restringir o cambiar el conjunto de estados posibles de los autómatas<sup>18</sup>, es que, sencillamente, no existe un nuevo nivel que lo haga. Las reglas son constitutivamente relacionales, no pueden actuar en unos elementos aislados que después se unan debido a cierta circunstancia y cambien su comportamiento. Por tanto, se puede considerar que el patrón dibujado no es sino la expresión de la regla en un sistema de representación bidimensional, pero no es un efecto totalmente distinto de la regla, o algo genuinamente nuevo. El patrón es la suma de las partes.

En segundo lugar, como se ha afirmado anteriormente, siguiendo las sugerencias de Deacon acerca de los grados de emergencia, los niveles de explicación en la emergencia débil son reducibles pero no simétricos. Es decir, que el dibujo son las reglas, pero no es exactamente lo mismo hablar del dibujo o patrón que hablar de las reglas. Lo mismo se decía, por ejemplo, de la emergencia en termodinámica: el calor es el movimiento de las partículas, pero no es lo mismo exactamente hablar de mecánica estadística que hablar de calor y temperatura.

En definitiva, se está considerando que, ontológicamente, no hay nada que restrinja los patrones que aparecen en las formas más simples de autómatas celulares de los propios individuos y sus reglas. Si bien es cierto que los patrones y algunas otras propiedades colectivas no son predicables, evidentemente, de los individuos, esto no parece una razón lo suficientemente poderosa como para hablar de emergencia en el pleno sentido (siempre, claro, según las definiciones establecidas, provenientes de las discusiones de capítulos anteriores), sino de una emergencia débil, cuyo supuesto nivel novedoso no es sino la acción, programada desde un principio, de los autómatas. Es posible que exista, además, la ilusión de algo parecido a la causación descendente, pero podría tratarse simplemente del fenómeno

<sup>18</sup>Es posible que en otros autómatas celulares, como en el caso del *Game of life* de Conway, sí exista causación descendente, o al menos algo que se le asemeja. Pero se trata, sin duda, de autómatas mucho más complicados y con más posibilidades de movimiento.

según el cual cada iteración del programa, y por tanto cada conjunto de estados efectivos, tiene influencia en los estados posteriores. Pero para explicar esto no es necesario recurrir a un nivel nuevo, sino simplemente a la propia forma de las reglas.

Por estas razones, parece razonable afirmar que no es necesario añadir ninguna entidad a la descripción ontológica aportada por la matriz sistémica y la tabla dependencias. O dicho de otra manera, parece razonable afirmar que la emergencia de patrones en los autómatas celulares elementales más sencillos es un caso de emergencia débil según las definiciones ofrecidas.

## 9.5. Emergencia fuerte: endosimbiosis

De nuevo dentro de la biología se presenta un buen ejemplo de fenómeno que posee características complejas: la aparición de las células eucariotas. El propio Holland, tratando la agregación de agentes en su modelo *Echo*, trae el ejemplo a colación. (Holland 2004, pág. 140) Este fenómeno se tratará usando como guía la teoría más comúnmente aceptada hoy en día para su estudio, la denominada teoría endosimbiótica, formulada por primera vez por Lynn Margulis. La idea principal de la teoría es que los orgánulos y el núcleo de las células eucariotas fueron en un inicio células procariotas que se fagocitaron pero no se digirieron, dando lugar a una célula mayor y con mucha más variedad de funciones. Para enunciar brevemente esta teoría, es necesario llevar a cabo un repaso<sup>19</sup> de los tipos de células y sus partes.

En la naturaleza se observan dos tipos de células: eucariotas y procariotas. Al reino de las eucariotas pertenecen los animales, vegetales, hongos y protistas; al reino de las procariotas, las bacterias y las arqueas. Las principales diferencias entre estos tipos de célula se aprecian en su composición, siendo la de los procariotas mucho más sencilla<sup>20</sup>:

- Procariotas:
  - Membrana: se trata de una capa compuesta de lípidos con proteínas incrustadas que llevan a cabo diferentes funciones. Su función más destacada es controlar el tráfico de sustancias entre el exterior y el interior de la célula. Adosada a ella existe una pared celular compuesta de peptidoglucano, lo que otorga a la célula gran resistencia, ayudándola a mantener su forma.
  - Citoplasma: es el medio interior de la célula, consistente principalmente en un medio acuoso con enzimas disueltas. No posee estructuras membranosas (a diferencia de las eucariotas). Hay en él dispersos numerosos ribosomas, más pequeños y sencillos que en las eucariotas. Tampoco posee citoesqueleto.

<sup>19</sup>Principalmente basado en Prescott, Harley y Klein 2004, págs. 43-98 y Paniagua y col. 1998, págs. 22-31.

<sup>20</sup>Esta somera descripción es sólo una simplificación que muestra los rasgos típicos. Algunas procariotas poseen más elementos de los descritos, como flagelos para propulsarse, así como algunas eucariotas son más simples que las que se han descrito, pero sin llegar a ser confundidas con las procariotas.

- Nucleoide: es una estructura difusa, sin membrana, que contiene el material genético de la célula en forma de una única molécula de ADN.
- Eucariotas:
  - Membrana: al igual que en las procariotas, se trata de un complejo lipoproteico que separa a la célula del medio que la rodea.
  - Citoplasma:
    - Hialoplasma: el medio interno de la célula. Contiene el citosol, que consiste en biomoléculas disueltas, y el citoesqueleto, que proporciona una estructura rígida (similar al papel de la pared celular procariota).
    - Orgánulos: se encuentran inmersos en el hialoplasma, y poseen complejidad muy variada. Los ribosomas y los centriolos no poseen membrana; en cambio, los lisosomas, el retículo endoplasmático, el aparato de Golgi, las mitocondrias y los cloroplastos (que se encuentran en las células vegetales<sup>21</sup>), sí poseen. Todas estas estructuras, salvo los ribosomas, están ausentes en las procariotas.
  - Núcleo: es casi el principal elemento diferenciador respecto de las procariotas. El núcleo, a diferencia del nucleoide, posee membrana (doble). También alberga el genoma de la célula.

Dentro de cada célula, los orgánulos desempeñan las funciones metabólicas y reproductivas codificadas en el material genético del núcleo o del nucleoide, según el caso, ayudados por las proteínas de carácter enzimático disueltas en el citoplasma. Por ejemplo, los ribosomas llevan a cabo el ensamblaje de aminoácidos en la síntesis de proteínas, el aparato de Golgi sirve como una suerte de clasificador de moléculas, transportándolas a su destino (ya sea el exterior, ya sea un lugar concreto en la célula), las mitocondrias llevan a cabo la oxidación de materiales combustibles, aportando energía a la célula, los cloroplastos son responsables de la fotosíntesis en los vegetales, etc.

Tras estas aclaraciones, se puede pasar a ofrecer una vista general de la teoría endosimbiótica:

Con mucho, la teoría más popular del origen de las células eucariotas es la teoría endosimbionte. Brevemente, según esta teoría la célula procariota ancestral perdió su pared celular y adquirió la capacidad para obtener nutrientes fagocitando otras procariotas. Cuando se desarrollaron las cianobacterias fotosintéticas, el ambiente se transformó lentamente en aerobio. Si un procariota fagocítico, ameboide, anaerobio –posiblemente con un núcleo desarrollado– fagocitase una célula bacteriana aerobia y estableciese una relación permanente

---

<sup>21</sup>Existen otros elementos diferentes en células animales y vegetales. Los animales poseen un centrosoma, y las vegetales una pared celular de celulosa en su parte externa.

simbiótica con ésta, el huésped podría adaptarse mejor al ambiente aerobio. La bacteria aerobia endosimbiótica evolucionaría finalmente para convertirse en una mitocondria. De forma similar, las asociaciones simbióticas con cianobacterias podrían originar la formación de cloroplastos y eucariotas fotosintéticos. Algunos investigadores han especulado sobre la posibilidad de que los cilios y los flagelos se formasen por la adhesión de bacterias espiroquetas [...] a la superficie de las células eucariotas, del mismo modo que las espiroquetas se fijan a la superficie del protozoo móvil *Myxotricha paradoxa*, que crece en el aparato digestivo de las termitas. (Prescott, Harley y Klein 2004, pág. 89)<sup>22</sup>

Es decir, que la aparición de las mitocondrias podría ser debida a la fagocitación de procariontes aerobias (que utilizan oxígeno para oxidar algún sustrato y así obtener energía), las cuales evolucionaron con el tiempo. Algo similar habría ocurrido en la aparición de cloroplastos, pero fagocitando cianobacterias, procariontes que son capaces de fotosíntesis. En cuanto al núcleo, parece haber surgido de la incorporación del nucleóide del huésped al interior de una arquea fagocitada, perdiéndose genes de ambas, y fusionando otros. (Prescott, Harley y Klein 2004, pág. 458)

Como ejemplos de pruebas que se suelen ofrecer en favor de esta teoría, se encuentran los siguientes:

Existen pruebas que apoyan la teoría endosimbiótica. Tanto las mitocondrias como los cloroplastos se parecen a las bacterias en cuanto a tamaño y aspecto, contienen DNA circular, como las bacterias y se reproducen semiautónomamente. Los ribosomas de las mitocondrias y los cloroplastos se parecen más a los procariontes que a los de la matriz citoplasmática eucariota. Las secuencias de los genes de los cloroplastos y las mitocondrias para formar RNA ribosómico y RNA de transferencia son más similares a las secuencias de los genes bacterianos que a las de los genes nucleares eucarióticos de rRNA y de tRNA. Finalmente, existen asociaciones simbióticas que parecen endosimbiosis bacterianas, donde se han perdido las características procariontes distintivas. Por ejemplo, el flagelado protozoario *Cyanophora paradoxa* tiene orgánulos fotosintéticos denominados cianelas con una estructura similar a la de las cianobacterias, y restos de peptidoglicano en la pared. El DNA es mucho más pequeño que el de las cianobacterias y se parece al de los cloroplastos. A pesar de estas pruebas, la teoría endosimbiótica es todavía especulativa y centro de continuas investigaciones y discusiones. (Prescott, Harley y Klein 2004, pág. 89)

En caso de estar en lo cierto, la teoría endosimbiótica ofrecería un ejemplo perfecto de emergencia fuerte, pues en el fenómeno que describe, aparecería una nueva estructura, en un nivel superior (por estar las eucariotas primitivas formadas por procariontes que

---

<sup>22</sup>Otra descripción similar se da en Alberts y col. 2008, págs. 859-860.

ha fagocitado; literalmente éstas serían sus partes propias), que depende de manera mereológica fuerte del nivel inferior y este hecho, además, ha cambiado el comportamiento de las procariotas del nivel inferior debido a modificaciones genéticas, de forma que ahora los resultados de sus procesos son utilizados para el mantenimiento de la unidad superior. El proceso se podría describir, simplídicamente, de la siguiente manera:

- **Objetos:**
  - Nivel 1: Proteínas y otras moléculas, como ATP, ADN, ARN, clorofila, etc.
  - Nivel 2: Los componentes de las células procariotas: ribosomas, membranas, nucleolos, etc.
  - Nivel 3: Las células procariotas: bacterias y arqueas. Algunos de los componentes de las proto-eucariotas: cloroplastos, mitocondrias, etc.
  - Nivel 4: Las células que se denominarán «proto-eucariotas», pues se describirá sólo el periodo de tiempo en el que se dan ciertas fagocitaciones y desapariciones de membranas, así como algunas modificaciones genéticas. No se describirá, por supuesto, el proceso completo de aparición de las eucariotas tal y como se conocen hoy, por lo que podría resultar incorrecto usar tal nombre. Se consideran en un nivel superior puesto que, según la teoría endosimbiótica, tienen procariotas como partes propias.
  
- **Propiedades:**
  - Existen, claro está, miles de propiedades que se habrían de tener en cuenta para una descripción exhaustiva. Por ejemplo, la capacidad de algunas proteínas de actuar como enzimas permitiendo procesos químicos, las propiedades del ARN mensajero, así como el ARN *transcriptasa*, que permiten descodificar y llevar a cabo las tareas contenidas en la información del ADN, etc. Sin embargo, en orden a ofrecer un esquema sencillo y abarcable dadas las pretensiones de este ejemplo, se tendrán sólo en cuenta algunas propiedades muy relevantes de algunos niveles.
  - Nivel 2: La capacidad del núcleo de albergar el material genético, la capacidad de los ribosomas de ensamblar aminoácidos.
  - Nivel 3: La capacidad de procariotas aerobias de producir energía a través de oxígeno y un sustrato, la capacidad de procariotas de producir energía a través de la luz.
  - Nivel 4: La capacidad de la proto-eucariota sustentarse debido a la acción de sus (proto)orgánulos.
  
- **Relaciones:**

- Nivel 2: La relación nucleoide-ribosomas que permite sintetizar las proteínas necesarias para mantener la procariota.
  - Nivel 3: La relación que surge entre los proto-orgánulos, que aúna los capacidades de estos últimos para el mantenimiento global del nuevo ente.<sup>23</sup>
- Estructuras:
    - Nivel 3: La estructura de las procariotas antes descrita, formada por membrana, citoplasma, nucleoide, etc.
    - Nivel 4: La nueva estructura que aparece debido a las fagocitaciones.
  - Procesos:
    - Nivel 1: Modificaciones e incorporaciones de nuevos elementos en el ADN.
    - Nivel 2: Síntesis de proteínas.
    - Nivel 3: Fagocitaciones, generación de energía.
  - Matriz sistémica:

$$S(\text{endosimbiosis}) = \left( \begin{array}{c} Ob(\text{prot}, \text{ADN}, \text{molec})\pi N1 \\ Ob(\text{mem}, \text{rib}, \text{nucleoide}, \text{núcleo}_{\text{proto}})\pi N2 \\ Ob_{\alpha}(\text{procariota})\pi N3 \\ Ob_{\beta}(\text{eucariota}_{\text{proto}})\pi N4 \\ Prop(\text{Prop}_{\text{gen}}, \text{Prop}_{\text{ensamb}})\pi N2 \\ Prop(\text{Ener}_{\text{o}_2}, \text{Ener}_{\text{luz}})\pi N3 \\ Prop(\text{Auto}_{\text{sustento}})\pi N4 \\ Rel(R1)\pi N2 \\ Rel(R2)\pi N3 \\ Est(\text{est}_{\text{proca}})\pi N3 \\ Est(\text{est}_{\text{proto}_{\text{eu}}})\pi N4 \\ Proc(\text{mod}_{\text{ADN}})\pi N1 \\ Proc(\text{proc}_{\text{sint}})\pi N2 \\ Proc(\text{proc}_{\text{fago}}, \text{proc}_{\text{energ}})\pi N3 \end{array} \right)$$

- Tabla de dependencias:

<sup>23</sup>Al considerarse lo que se ha denominado proto-eucariotas, se toman los proto-orgánulos como pertenecientes al nivel tercero, el de las procariotas. En el caso de las eucariotas propiamente dichas, sus orgánulos podrían considerarse también en el nivel segundo. Por la misma razón, y con semejantes consideraciones, se ha considerado un cuarto nivel para las proto-eucariotas, puesto que en el proceso de aparición, las procariotas llegan a ser partes propias suyas. En la actualidad, ambos tipos de célula podrían verse en el mismo nivel, pues los orgánulos de las eucariotas dejaron de ser procariotas a través de selección natural.

$Prop_{gen}(nucleoide) \wedge Prop_{gen}(núcleo_{proto}) \wedge Prop_{ensamb}(rib)$ $Ener_{o_2}(procariota_{aer}) \wedge Ener_{luz}(procariota_{foto})$ $Auto_{sustento}(eucariota_{proto})$
$F(est_{proca}, proc\_fago) \wedge F(est_{proca}, proc\_energ)$
$[proc\_fago \rightarrow P(procariota, eucariota_{proto})] \rightarrow$ $[Auto_{sustento}(eucariota_{proto}) \wedge \exists x(x = est_{proto\_eu})$ $\wedge F_{mf}(eucariota_{proto}, procariota)]$

En el último enunciado de la tabla se expresa que la fagocitosis da lugar a la proto-eucariota, y esto a su vez hace que esta entidad tenga la propiedad de auto-sustentarse, así como una estructura determinada y una dependencia mereológica fuerte respecto de las procariotas. La entidad denominada proto-eucariota posee entonces las características enunciadas en la definición de emergencia: pertenece a un nivel superior<sup>24</sup> y depende fuertemente de su base. Además, la propiedad denominada auto-sustento puede verse como un caso de causación descendente, pues se modifica en parte el comportamiento que tenían las procariotas aisladas, utilizándose el producto de su actividad para el mantenimiento de la unidad superior.

Pese a que se ha observado que en este fenómeno se da un caso de causación descendente, un estudio en profundidad de este fenómeno a través de otro ejemplo ayudará a perfilar la ontología del mismo.

## 9.6. Causación descendente: células de Bénard

Se ha traído a colación varias veces a lo largo de la exposición, como ejemplo de emergencia de una estructura, así como de modificación de esa estructura del espacio de estados del nivel inferior, es decir, de causación descendente, el ejemplo de las células de Bénard. En esta sección se pretende llevar a cabo un análisis más profundo de dicho fenómeno, enfocado a clarificar la idea de causación descendente a través de un ejemplo concreto.

Robert Bishop lleva a cabo un análisis de este fenómeno, tratando de extraer de él algunas tesis de carácter ontológico que ayuden a comprender mejor la emergencia y la causación descendente. En su análisis sostiene que, en los sistemas complejos, el control es ejercido a través de constricciones entre jerarquías: «the lower-level constituents provide necessary but not sufficient conditions for the existence and behavior of some of the higher-level structures [...]. Furthermore, the lower-level constituents may not even provide necessary and sufficient conditions for their own behavior if the higher-level constituents

<sup>24</sup>En este caso, no se trata simplemente de una estructura o una propiedad o un proceso, sino más bien de un objeto que tiene estas otras tres como partes, algo permitido por la disyunción inclusiva de la definición.

can influence the behavior of lower-level constituents.» (Bishop 2005, págs. 232-233) Es decir, que en los sistemas complejos:

- El nivel inferior es necesario, pero no suficiente, para explicar el nivel superior
- El nivel inferior es necesario, pero no suficiente, para explicar su propio comportamiento
- Esto es debido a
  - El nivel superior, si se trata de emergencia fuerte, goza de cierta autonomía de comportamiento
  - Por la misma razón, el nivel superior puede afectar el comportamiento del inferior
  - Así, ambos grupos de entidades son necesarios para la explicación del comportamiento global del sistema

Se propone el caso de la convección Rayleigh-Bénard como un ejemplo de jerarquía de control en la que las constricciones son provocadas, no solamente debido a condiciones externas que afectan al sistema, sino debido a las propias estructuras que se forman dentro de éste. Esta convección es la que da lugar a las estructuras conocidas como células de Bénard y, de forma resumida, puede describirse así:

Initially a layer of fluid is sandwiched between two horizontal thermally conducting plates. The lower plate is heated while the upper one is maintained at a fixed temperature, establishing a temperature gradient  $\Delta T$  in the vertical direction. The fluid near the lower plate undergoes thermal expansion and is less dense than that above, creating an instability at a finite wavelength in the presence of gravity. This buoyancy force tends to lift the whole mass of fluid from the lower plate (a consequence of the conservation of mass), while the upper plate acts as an external constraint against such motion. As long as  $\Delta T$  remains small enough, thermal conduction dissipates the temperature gradient sufficiently to maintain a stable state such that the fluid near the lower plate does not rise. In this state, the energy lost by the system due to dissipation balances the amount of potential energy available to be released by the system due to the density gradient in the direction opposite to gravity. (Bishop 2005, pág. 236)

Se tienen, entonces, estos elementos:

- Placa inferior, la cual aumenta su temperatura
- Placa superior, que actúa como constricción externa del sistema y se mantiene a temperatura fija

- Fluido, que se coloca entre ambas placas

Si el gradiente de temperatura permanece pequeño, el fluido se mantiene en un estado estable. Si se supera cierto umbral, comienzan a aparecer lo que se ha denominado «células de Bénard». Si la temperatura sigue subiendo, se empieza a apreciar un comportamiento caótico, desapareciendo las células.

Las células actúan como una jerarquía de control sobre los elementos del fluido. Algunos movimientos posibles en el estado de equilibrio ya no están disponibles cuando se presentan las células, es decir, se reducen los grados de libertad del sistema. Así, el sistema como un todo establece los estados que serán accesibles a los elementos del fluido: existe causación descendente. Si ésta no se diera, el fluido en estado uniforme podría moverse en principio en cualquier dirección. La figura 9.4 muestra el aspecto de este fenómeno.<sup>25</sup>

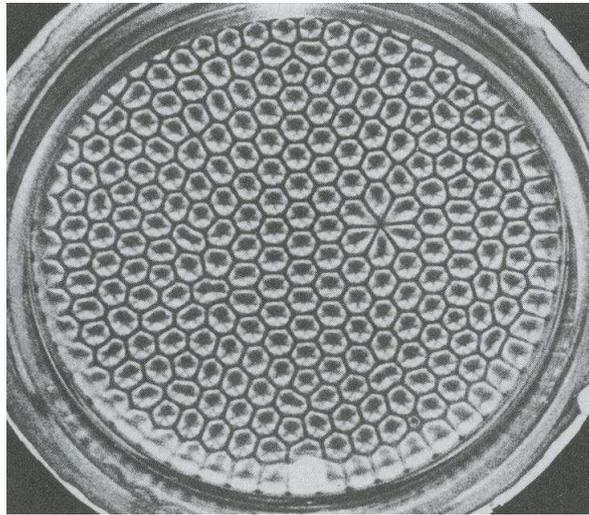


Figura 9.4: Aspecto de las células de Bénard en una placa.

Para ofrecer una imagen más o menos completa de la ontología del sistema, en primer lugar, se ha de describir el conjunto de leyes que gobiernan el nivel inferior o nivel de las partículas del fluido. Las ecuaciones de fluidos que describen la convección Rayleigh-Bénard son tres: la ecuación de transporte de calor, la ecuación Navier-Stokes y la ecuación de continuidad. (Bishop 2005, pág. 233) Juntas expresan que la velocidad, la temperatura y la densidad están relacionadas así:

- El flujo del fluido induce variaciones en la temperatura
- Cambios en la densidad del fluido debidos a la temperatura inducen cambios en el flujo
- La ecuación de continuidad expresa la conservación de la masa

---

<sup>25</sup>Imagen tomada de Chatterjee 2016.

Por esto, el cambio de temperatura provocado por la placa inferior, cuando es lo suficientemente grande, provoca que el líquido (que ha perdido densidad), venza la fuerza de la gravedad y empuje hacia arriba el resto de la masa. A su vez, este cambio en la velocidad, vuelve a provocar cambios en la temperatura.

Las siguientes consideraciones acerca de la mecánica de los fluidos en general ayudarán a comprender mejor el fenómeno que se está estudiando (Bishop 2005, págs. 233-235):

En primer lugar, se ha de tener en cuenta que las moléculas del fluido no se mueven de forma totalmente independiente, como se suele enunciar que ocurre en los gases. En los fluidos, por el contrario, existen fuerzas cohesivas de naturaleza molecular que producen que cada partícula interactúe con sus vecinas más cercanas (en un radio de entorno a  $r^{-7}$ , siendo  $r$  el radio de la molécula).

En segundo lugar, se asume la denominada «hipótesis del continuo», según la cual se pueden tratar propiedades como la velocidad o la masa como siendo poseídas por el conjunto de las moléculas, aunque realmente éstas sean más bien sostenidas por estas moléculas individuales.

Además de las fuerzas moleculares, existen otros tipos de fuerzas que actúan sobre los fluidos. Las de largo alcance, como la gravedad, electromagnetismo o fuerza centrífuga, que afectan a toda la masa. Las de corto alcance, por otra parte, afectan a una fina capa de moléculas, y se denominan fuerzas de superficie.

En cuarto lugar, las relaciones espaciales entre las moléculas también han de ser tenidas en cuenta. El hecho de que la molécula  $x$  ocupe cierto lugar, provoca que la  $y$  no pueda ocuparlo, creándose así correlaciones cuya fuerza varía con la densidad. Este fenómeno favorece que aparezcan comportamientos colectivos, llegando al punto de que, dadas altas correlaciones, el comportamiento individual de las moléculas sólo pueda ser modificado a través de cambios globales en el fluido.

Resulta también de suma importancia el hecho de que dentro de un fluido tiendan a aparecer jerarquías según las distintas dinámicas que aparecen en las diferentes escalas de tiempo. Por ejemplo, pueden convivir procesos difusivos (lentos) con procesos convectivos (rápidos), cuyo *ratio* influye en la aparición y desaparición de estructuras coherentes: si los valores son altos, las turbulencias dominan el sistema; si son pequeños, nunca aparecen estructuras. La aparición de formas estables tiende a darse por tanto en un rango intermedio.

Por último, es del todo destacable el efecto memoria del que gozan los fluidos. Al moverse una partícula, intercambia su momento con sus vecinas, de tal forma que, pasado el tiempo, se ha creado una suerte de movimiento global, transmitiéndose la información del movimiento de una partícula a otra parte del fluido a lo largo del tiempo.

Debido a la interacción de todos estos factores, y al calentamiento de la placa inferior dentro de un rango determinado de temperatura, los elementos de fluido comienzan a organizarse en células de Bénard, dándose un comportamiento de orden superior que confina a las partículas individuales dentro de las nuevas estructuras. La nueva jerarquía

de elementos da lugar a un comportamiento cohesivo, que además es resistente a cierto grado de perturbaciones de temperatura. Las células restringen los grados de libertad de las partículas del siguiente modo:

Bénard cells act as a control hierarchy, constraining the motion of fluid elements. Bénard cells emerge out of the motion of fluid elements as  $\Delta T$  exceeds  $\Delta T_c$ , but these large-scale structures determine modifications of the configurational degrees of freedom of fluid elements such that some motions possible in the equilibrium state are no longer available. In the original uniform state, the fluid elements can exhibit a particular range of motions constrained by the system symmetries and boundaries, by body forces such as gravity, and so forth. In particular, as long as  $\Delta T < \Delta T_c$ , fluid elements cannot access rotational states of motion characteristic of Rayleigh-Bénard convection. In the new nonequilibrium steady state, the fluid elements exhibit coherent motion (Bénard cells), but most of the states of motion characteristic of the original uniform state are no longer accessible (e.g., fluid elements cannot sit motionless). (Bishop 2005, pág. 237)

De las relaciones entre el fluido y el entorno surgen entonces nuevas dinámicas, para cuya explicación no es necesario postular ningún tipo de nueva fuerza, sino observar la acción colectiva sobre las fuerzas ya conocidas. Las células de Bénard, estructuras emergentes, impiden que se den movimientos aleatorios a su alrededor, y así pueden mantenerse sin destruirse. No parece, entonces, que simplemente observando el fluido de forma general puedan explicarse estos fenómenos. Se da una nueva estructura, que está conformada por las partículas del nivel inferior, pero cuya influencia sobre estas partículas parece necesaria para explicar la totalidad del fenómeno. Se tiene así un buen candidato a emergencia fuerte, y junto con ella, de causación descendente, que es el fenómeno que interesa principalmente en este análisis.<sup>26</sup>

El análisis de la ontología del sistema estudiado y su posterior comparación con la definición ofrecida de causación descendente ayudará a la comprensión de este importante ingrediente de los sistemas complejos. Los elementos que, de forma simplificada, pueden observarse, son los siguientes:

- Objetos:
  - Nivel 1: fluido. *Ob(flu)*<sup>27</sup>

---

<sup>26</sup>En el análisis ontológico de la endosimbiosis también pudo apreciarse que parecía necesario tener en cuenta algún tipo de causación descendente. Sin embargo, el presente ejemplo puede ser un mejor modelo de dicho fenómeno, pues se mueve en una escala de tiempo mucho menor, y puede observarse, por así decir, a simple vista.

<sup>27</sup>Se considera una fusión de las moléculas a la que se le pueden adscribir algunas de las propiedades de éstas.

- Nivel 2: placas conductoras, células de Bénard.  $Ob(pla_{inf}, pla_{sup}, cel)$
- Propiedades:
  - Nivel 1: velocidad, temperatura y densidad del fluido.  $Prop(V, T, D)$
  - Nivel 2: temperatura de la placa inferior.  $Prop(T_p)$
- Relaciones:
  - Nivel 1: posición de las capas de fluido<sup>28</sup>, leyes de los fluidos, fuerzas (moleculares, gravitatorias, de superficie...), la placa inferior calienta el fluido.  $Rel(Pos, Ley, Fu, Cal)$
- Estructuras:
  - Nivel 2: la forma de las células, el entramado placas-recipiente en cuyo interior se encuentra el fluido  $Est(form, rec)$
- Procesos:
  - Nivel 1: cambio de temperatura, cambio de densidad y cambio de velocidad del fluido.  $Proc(c\_temp, c\_dens, c\_vel)$
- Matriz sistémica:

$$S(convec) = \begin{pmatrix} Ob(fluid)\pi N1 \\ Ob(pla_{inf}, pla_{sup}, cel)\pi N2 \\ Prop(V, T, D)\pi N1 \\ Prop(T_p)\pi N2 \\ Rel(Pos, Ley, Fu, Cal)\pi N1 \\ Est(form, rec)\pi N2 \\ Proc(c\_temp, c\_dens, c\_vel)\pi N1 \end{pmatrix}$$

- Tabla de dependencias:

$V(fluid) \wedge T(fluid) \wedge D(fluid) \wedge T_p(pla_{inf})$
$F(form, [c\_temp, c\_dens, c\_vel])$
$F(Pos, cel) \rightarrow F(Card(POS), cel)$
$F(Pos, cel)$
$F(Card(POS), cel) \rightarrow F(EE_p(fluid), cel)$

<sup>28</sup>Se considera relacional porque se mide respecto de una referencia, por ejemplo, un eje de coordenadas. Al conjunto de todas las posiciones posibles se lo denominará *POS*.

Las últimas tres líneas de la tabla de dependencia expresan lo siguiente: la posición relativa de las capas de fluido depende de las células, como se ha visto en el estudio físico del sistema. Esto es así porque, debido a su propio movimiento, limitan el movimiento del fluido circundante. Por ello, se puede afirmar que el conjunto de todas las posiciones posibles depende de las células, y por ende, el espacio de estados posibles del fluido depende de dichas células. Como la influencia es limitante, se podría concluir con el siguiente enunciado que coincide, justamente, con la parte central de la definición de causación descendente:  $F([Var(EE_p(fluid)) < 0], cel)$ . Se omiten los subíndices temporales pues en este caso no resultan aclaratorios. El resto de condiciones de la definición también se cumple: las células son entidades fuertemente emergentes respecto del fluido dentro del sistema *convec* (por convección de Rayleigh-Bénard).

## 9.7. Sistemas complejos: hormigueros

De la enorme gama de sistemas complejos que se pueden encontrar en la naturaleza, las colonias de hormigas son unos de los más estudiados. Esto es debido a que los individuos básicos del sistema pueden ser observados a simple vista y su rango de movimientos es limitado a unos pocos cientos de metros a lo sumo, lo que hace que sea relativamente fácil de estudiar. Además, las hormigas pueden ser trasladadas fácilmente a un laboratorio para observar su comportamiento en un entorno controlado. Todo esto también facilita la tarea de elaborar modelos computacionales que permitan saber más acerca del comportamiento de estos insectos a través de modificaciones en los parámetros que se consideran clave.

Siempre resulta llamativo observar las largas hileras de hormigas que, sin ningún tipo de jefe o guía, y a través de movimientos que en muchos casos parecen aleatorios, son capaces de encontrar alimento y llevarlo de vuelta con el resto de sus compañeras. Simplemente, a través de las interacciones entre los individuos, normalmente mediadas por algún agente químico, se obtiene el sustento de todo el hormiguero. Es por esto por lo que este fenómeno biológico suele tomarse como un buen candidato a sistema autorregulado y con propiedades emergentes.

Se conocen miles de especies de hormigas, muchas de las cuales comparten unas características comunes. (Benítez López 2013, págs. 260-263) Suelen estar especializadas en castas, cada una de las cuales realiza una tarea determinada. De su morfología, interesan especialmente sus antenas, mediante las cuales pueden detectar feromonas, así como vibraciones y corrientes de aire. Respecto de los ojos, la visión de las hormigas suele ser muy pobre, limitada a la detección del movimiento. Una de las principales maneras de comunicación que parece darse entre las hormigas funciona mediante el uso de rastros de feromonas que son depositadas por unas y detectadas por otras. Por ejemplo, a la hora de llevar a cabo el forrajeo este mecanismo resulta esencial:

Las hormigas salen del nido en busca de comida; cuando la encuentran, vuelven al nido con ella; del hormiguero salen, entonces, otras hormigas que

forman parte de las filas de hormigas, algunas de las cuales vuelven con comida. ¿Cómo se producen estos fenómenos? Se suele decir que las hormigas se comunican mediante rastros de feromonas. La feromona, una sustancia química, no existía antes en el entorno, pero cuando una hormiga ha encontrado comida y vuelve cargada con ella, va dejando un rastro de feromona por donde pasa. Otras hormigas pueden detectar ese rastro gracias a sus antenas y seguirlo. (Benítez López 2013, pág. 261)

El análisis ontológico que se propone a continuación se centra en una especie concreta de hormiga, la *Eciton burchellii*, que ha sido ampliamente estudiada. En el trabajo de Deneubourg y colaboradores (Deneubourg y col. 1989) se presentan numerosos experimentos y modelos computacionales. Esta especie de hormigas posee algunas características peculiares (Leigh 1999, págs. 35-36):

En primer lugar, no construyen hormigueros excavando túneles en el suelo, sino que conforman unas estructuras provisionales denominadas vivacs, que están compuestas por los propios cuerpos entrelazados de las hormigas, las cuales se agarran utilizando sus patas y mandíbulas. Estos vivacs se emplazan en lugares como troncos de árbol o agujeros en el suelo. Periódicamente una gran cantidad de hormigas se aleja del vivac y comienza la búsqueda de alimento formando largas columnas que se ramifican.

Además, esta especie de hormiga está dividida en castas. Se diferencian al menos dos de ellas: obreras y reinas. Dentro de las obreras existen cuatro grupos según el tamaño, siendo las más grandes las que hacen el papel de soldados. Las reinas ponen los huevos, las obreras forrajean y eligen el emplazamiento del vivac y los soldados defienden al resto de hormigas usando las grandes mandíbulas que las diferencian.

En el trabajo de Deneubourg y colaboradores se determinaron las siguientes características acerca de la organización del forrajeo en las *Eciton burchellii*:

- Las hormigas dejan un rastro de feromonas al salir y al volver del vivac tras encontrar una presa
- El hecho de que una hormiga elija un camino u otro puede depender de dos cosas:
  - De un movimiento azaroso si la hormiga pertenece al frente de la columna, pues al ser pionera, no puede seguir el rastro de ninguno de sus congéneres
  - De la fuerza del rastro de feromonas, una vez ya ha pasado alguna hormiga por la zona. Cuantas más hormigas pasan por una zona, más fuerte es el rastro y esto, a su vez, atrae aún más hormigas
- La velocidad de las hormigas aumenta con la fuerza del rastro de feromona
- El número de hormigas que parten en busca de alimento es relativamente constante

El hecho de que las hormigas dejen rastros de feromonas tanto a la ida como a la vuelta se puede constatar a través del siguiente experimento. Si a estos animales se les presenta una bifurcación en el camino, en la que obligatoriamente tienen que elegir una de dos opciones, se observa que siempre tienden a elegir el camino más corto. Esto sucede así debido a que, al pasar a través del camino más corto, las hormigas pueden llegar a la fuente de alimento y volver en menos tiempo, reforzándose así el rastro de feromonas mucho más que en el camino más largo, puesto que la dispersión de feromonas es llevada a cabo tanto por las hormigas que van como por las que vuelven con el alimento. Esto crea un bucle de realimentación positivo que hace que el camino más corto sea cada vez más y más transitado. Si sólo segregaran feromonas a la ida, el camino más corto y el más largo tendrían aproximadamente la misma afluencia, pues se elegirían al azar. (Goss y col. 1989)<sup>29</sup>

A su vez, puede observarse un bucle de realimentación negativo que regula la intensidad de la actividad de forrajeo según las necesidades energéticas del hormiguero: cuantas más hormigas hambrientas hay, más salen a buscar alimento, lo que aumenta las reservas del hormiguero más rápido, de forma que se disminuye la intensidad de búsqueda, etc. (Deneubourg y col. 1989, págs. 306-604)

A través de los elementos propuestos en esta descripción, se está en condiciones de presentar el análisis ontológico que ponga de relieve las características complejas de este sistema:

Se observa, en primer lugar, al menos un caso de emergencia fuerte: las columnas y ramas que se crean en el proceso de forrajeo. Parece que los elementos que intervienen en su aparición son simplemente las feromonas, los receptores de éstas (las antenas) y la relación que se establece entre ambos. Podría considerarse también que el hormiguero, como conjunto de individuos al que se refieren todos los procesos, también constituye una entidad emergente no reducible.

Se aprecian, además, dos casos de causación descendente: las columnas y ramas modifican el comportamiento de las hormigas individuales, restringiendo sus movimientos a unos caminos ya establecidos.<sup>30</sup> Además, se ha visto que la actividad de forrajeo se modifica según las necesidades del hormiguero.

En tercer lugar, se han observado al menos dos bucles de realimentación, que como se ha visto, constituyen la base de la autorregulación. Un bucle de refuerzo positivo se aprecia cuando el camino más usado es entonces el más reforzado mediante feromonas, ganando así más adeptos y por tanto más refuerzo. Por otra parte, existe un bucle negativo que regula la mayor o menor intensidad de forrajeo según la disponibilidad de alimento.

Por último, y como resultado de todo lo anterior, se observa que todas estas actividades redundan en el mantenimiento del hormiguero en el sentido material. Es decir, que se da

---

<sup>29</sup>Fenómeno también descrito en Floreano y Mattiussi 2008, pág. 521.

<sup>30</sup>Tanto es así, que si por alguna razón las hormigas quedaran atrapadas en un rastro circular, seguramente lo seguirían hasta la extenuación, pues lo reforzarían constantemente al caminar sobre él una y otra vez.

un intercambio de materia y energía con el medio que mantiene la existencia del conjunto: mueren animales que son devorados, perecen hormigas, se dejan residuos, nacen nuevas hormigas y nuevas presas, etc.

Puede observarse que existe cierta relación y dependencia entre todos estos fenómenos: la emergencia fuerte permite la causación descendente, que a su vez provoca una autorregulación que, por último, hace posible la *autopoiesis*. Se puede expresar a través de la siguiente tabla:

<i>Emergencia fuerte</i>	<i>Causación descendente</i>	<i>Autorregulación</i>	<i>Autopoiesis</i>
<b>Columnas</b>	Cambio del movimiento	Realimentación positiva	Introducción de alimento
<b>Hormiguero</b>	Cambio del forrajeo	Realimentación negativa	Consumo de alimento

Estas dos cadenas de elementos pueden denominarse *Bloque<sub>1</sub>* y *Bloque<sub>2</sub>*. Cada una de ellas, en un momento determinado, depende de su propio resultado en un momento anterior. Es decir, que el hecho de que se lleve a cabo forrajeo, es porque algún forrajeo anterior ha tenido éxito y se ha introducido alimento en el hormiguero, manteniéndolo. A su vez, si no se ha aumentado la búsqueda de alimento, se corre el peligro de que el número de individuos descienda peligrosamente, lo cual afectaría a futuras búsquedas (en las que suelen perecer muchos individuos), etc. Pero, además, ambos bloques están conectados entre ellos a través de sus sucesivos resultados en una serie temporal: sin introducción de alimento no hay consumo y viceversa.

Identificados ya los principales elementos y fenómenos del sistema, puede introducirse el análisis ontológico a través del método habitual:

- Objetos:
  - Nivel 1: hormigas, feromonas y alimento.  $Ob(h, fer, al)$  ( $O_{1-3}$ )
  - Nivel 2: hormiguero.  $Ob(horm)$
- Propiedades:
  - Nivel 1: receptores de feromona y fuerza del rastro.  $Prop(R, F)$  ( $P_{1-2}$ )
  - Nivel 2: autogestión y afluencia de una columna o rama.  $Prop(A, Af)$
- Relaciones:
  - Nivel 1: receptor-rastro.  $Rel(Rec)$  ( $R_1$ )
- Estructuras:

- Nivel 1: distribución de las presas.  $Est(dist)$
- Nivel 2: columnas y ramas, vivacs.  $Est(col, viv)$
- Procesos:
  - Nivel 1: captación del rastro, segregación del rastro, forrajeo (= movimiento + arrastre de presa) y consumo de alimento.  $Proc(cap, seg, for, mov, ar, cons)$
  - Nivel 2: sustento.  $Proc(sust)$
- Matriz sistémica:

$$S(hormiguero) = \begin{pmatrix} Ob(h, fer, al)\pi N1 \\ Ob(horm)\pi N2 \\ Prop(R, F)\pi N1 \\ Prop(A, Af)\pi N2 \\ Rel(Rec)\pi N1 \\ Est(dist)\pi N1 \\ Est(col, viv)\pi N2 \\ Proc(cap, seg, for, mov, ar, cons)\pi N1 \\ Proc(sust)\pi N2 \end{pmatrix}$$

- Tabla de dependencias:

$R(h) \wedge F(fer) \wedge A(horm)$
$Rec(fer, h)$
$F(for, [dist, cap, seg]) \wedge F(col, [dist, cap, seg])$
$F(F_t, Af_{t+1}) \wedge F(Card(al)_t, for_{t+1})$
$F_{mf}(col, [h, fer, al, R, F, Rec]) \wedge F_{mf}(sust, [O_{1-3}, P_{1-2}, R_1])$
$F(Var(Card(EE_p(mov))), col) \wedge F(Var(Card(EE_p(for))), sust)$
$F(Bloque_{1t}, Bloque_{1t+1}) \wedge F(Bloque_{2t}, Bloque_{2t+1}) \wedge F(Bloque_{1t}, Bloque_{2t+1})$

Pueden reconocerse en esta descripción ontológicas todos los fenómenos estudiados de forma aislada en los ejemplos de las secciones anteriores, expresados mediante su esquema formal:

- En la emergencia fuerte, una entidad del nivel superior depende de forma mereológica fuerte o intermedia de otra entidad del nivel inferior. Esto queda expresado en estos dos enunciados:
  - $F_{mf}(col, [h, fer, al, R, F, Rec])$
  - $F_{mf}(sust, [O_{1-3}, P_{1-2}, R_1])$

- En la causación descendente, la variación del cardinal de un conjunto que representa el espacio de estados posibles de algún proceso o sistema, depende de una entidad de un nivel superior, como en estos dos casos:

- $F(\text{Var}(\text{Card}(EE_p(\text{mov}))), \text{col})$
- $F(\text{Var}(\text{Card}(EE_p(\text{for}))), \text{sust})$

- En la autorregulación, los bucles se describían como la dependencia de la entrada respecto de la salida en un tiempo posterior. Se trata de una autorregulación fuerte, como en el caso de *quorum sensing* estudiado anteriormente, porque los valores de salida pretendidos se fijan desde dentro de las dinámicas del propio sistema, sin la intervención de ningún elemento exterior:

- $F(F_t, Af_{t+1})$
- $F(\text{Card}(al)_t, for_{t+1})$

- El resultado de todo esto es un par de encadenamientos de procesos y estructuras, que se han denominado *Bloque<sub>1</sub>* y *Bloque<sub>2</sub>*, los cuales producen el intercambio de materia y energía con el medio, que en la definición de sistema complejo de segundo grado se denominó *Im*, y que también puede ser denominado *autopoiesis*. La ontología de estos bloques se ha expresado así:

- $F(\text{Bloque}_{1t}, \text{Bloque}_{1t+1})$
- $F(\text{Bloque}_{2t}, \text{Bloque}_{2t+1})$
- $F(\text{Bloque}_{1t}, \text{Bloque}_{2t+1})$

Muchos aspectos del hormiguero han quedado por introducir en el análisis, como el patrón concreto de formación de vivacs, o la tarea específica de cada grupo de hormigas. Sin embargo, simplemente con los elementos expuestos parece claro que un hormiguero de tales características puede ser englobado bajo el título de sistema complejo de segundo grado (según la nomenclatura empleada en las definiciones): posee autorregulación fuerte y un intercambio de materia y energía que mantiene el orden del sistema en tanto que entidad sujeta a las leyes termodinámicas.

Esta exposición se ha centrado en los sistemas complejos de segundo grado principalmente porque en la literatura especializada son los sistemas complejos paradigmáticos. Es cierto que en ocasiones se mencionan otros sistemas en los que gran cantidad de elementos interactúan, o en los que existen muchos bucles de realimentación encadenados. Sin embargo, como se ha visto, estas características no garantizan realmente la complejidad.

En el primer caso, cuando se tienen muchos elementos en interacción, suele suceder que se formen patrones visuales, pero que en el fondo son casos de emergencia débil, como se

vio al analizar los autómatas celulares elementales, y parece suceder también en los atascos de tráfico (un ejemplo muy empleado).

En el segundo caso, el de los bucles encadenados, la cantidad de bucles no tiene por qué favorecer una suerte de salto cualitativo. Se ha de tener en cuenta que la autorregulación fuerte parece estar unida a la causación descendente, y ésta a su vez a una emergencia fuerte. Es decir, que es una emergencia del propio sistema la que restringe los grados de libertad de los componentes, provocando una regulación sin necesidad de control externo. Esto no parece suceder ni en los sistemas de control más sofisticados, en los que puede haber causación descendente<sup>31</sup>, pero no se podría identificar ésta como la causa de los bucles de realimentación, sino un diseño externo. Por supuesto, el gasto de cierto elemento (combustible, electricidad, etc.) no puede considerarse intercambio de materia y energía, puesto que la máquina simplemente agotaría el recurso hasta detenerse, sin auto-abastecerse a través de alguna suerte de proceso similar al metabólico.

## 9.8. Conclusiones

Se ha llevado a cabo un análisis ontológico de cada una de las propiedades que suelen asociarse a los sistemas complejos, empleando todas las herramientas que se han desarrollado a lo largo de la tesis. Esto se ha realizado a través de una selección de casos concretos en los que dichas propiedades resaltan de una manera especial, lo que facilita su estudio. La forma de llevar a cabo los análisis ha sido la siguiente:

Antes que nada, se han identificado todos los componentes relevantes para el comportamiento del sistema: objetos, propiedades, relaciones, etc. Esta información se ha condensado en las llamadas matrices sistémicas.

A continuación, se han expresado, a través de las nociones mereológicas y de fundamentación, algunas de las relaciones ontológicas relevantes para la comprensión del sistema, como la dependencia de cierto proceso respecto de alguna estructura, o la influencia de una entidad superior sobre una inferior. De esta forma, se estaba en condiciones de comparar los fenómenos sistémicos reales con las definiciones ofrecidas en anteriores capítulos. Esta información se presenta de forma sintética a través de las denominadas tablas de dependencias.

Se ha podido observar que estas características de la complejidad, como la emergencia fuerte, la emergencia débil o la causación descendente, parecen tener un esquema ontológico común, que puede ser expresado a través del lenguaje propuesto.

Además, se ha hecho notar que la expresión de la ontología de estas propiedades o fenómenos complejos permite identificarlos más tarde en el estudio de sistemas complejos completos, ayudando a su comprensión.

---

<sup>31</sup>En el ejemplo típico propuesto por Polanyi, la estructura de la máquina restringe la aplicación de las leyes físicas elementales.

A través del estudio de un sistema complejo, en concreto un hormiguero, se ha podido apreciar que estas características complejas (emergencia, autorregulación, etc.) sostienen entre sí una peculiar trabazón que no parece darse en sistemas dinámicos no complejos que poseen alguna de estas características por separado. Esta peculiar relación es la siguiente: una emergencia fuerte produce una influencia en algunos elementos del nivel inferior, es decir, una causación descendente, y es precisamente esta influencia la que favorece la aparición de bucles de realimentación que hacen que el sistema mantenga un cierto orden.

Esta última característica es lo que parece diferenciar a los denominados sistemas complejos de segundo grado de los de primer grado, que por carecer de ella, podrían considerarse más bien complicaciones de sistemas de control o similares (autorregulados débilmente), pese a que existan numerosos elementos sencillos en interacción e incluso algunos casos de emergencia (débil en su mayoría). Por esto, quizá convendría tomar los sistemas complejos de primer grado como un sentido secundario del concepto de sistema complejo que en ocasiones se emplea en la literatura, pero que difiere ontológicamente de los sistemas referidos por el sentido primario.

# Capítulo 10

## Conclusiones finales

### 10.1. Sobre el estudio preliminar de los sistemas complejos

- Existen al menos cuatro conceptos que pueden considerarse básicos en el estudio de los sistemas complejos: dinámica, emergencia, nivel y autorregulación.
- Estos conceptos dividen un sistema complejo en sus momentos principales, pero no están exentos de problemas:
  - Se necesita algún concepto claro para establecer de forma rigurosa qué es la dinámica de un sistema.
  - El concepto de emergencia es problemático en sí mismo, debido principalmente a dos fenómenos:
    - Su fuerza o reducibilidad.
    - La causación descendente.
  - No existe una definición rigurosa de nivel ni se ha establecido de qué tipo de entidad se trata y cómo se relaciona con los otros niveles.
  - Resulta necesario aclarar la ontología de la autorregulación. Pese a que se suelen mencionar los bucles de retroalimentación, no se explica cómo se originan o qué diferencias existen entre la forma de autorregularse de las máquinas y la de los sistemas biológicos más allá de la apertura termodinámica, que ofrece una nota distintiva pero no una explicación.
  - A su vez, la falta de definición del estatuto de las propiedades sistémicas entorpece también la comprensión de la autorregulación.

### 10.2. Sobre mereología y fundamentación

- El término «parte» es polisémico. En un sentido estrecho, suele referirse solamente a partes concretas; en sentido amplio, puede usarse para englobar tanto las partes

concretas como las abstractas. Una mereología que sólo contempla partes concretas se denomina extensional.

- Una mereología que pretenda usarse para el estudio de los sistemas complejos habrá de poder hacer uso de partes abstractas, como propiedades, relaciones o estructuras. Será, por lo tanto, no extensional.
- La mereología puede formalizarse de forma axiomática de varias maneras, pero se han identificado ciertas tesis y principios que no han de ser incluidos si es que se quiere poder introducir partes abstractas. La teoría se ha denominado, según la terminología estándar, WGM1.
- A través del concepto de fundamentación, siguiendo a Husserl, se puede establecer de forma precisa la diferencia entre partes abstractas y concretas.
- La noción de fundamentación, por sí sola, no puede hacer frente a los fenómenos sistémicos con suficiente precisión. Esto es así por dos motivos:
  - Desde el punto de vista de los todos,  $WF$  no permite distinguir entre un todo débil, como un montón de piedras, uno intermedio, como una máquina y uno fuerte, como un ser vivo.
  - Desde la perspectiva de las partes,  $F$  es una noción en ocasiones demasiado fuerte. Puede darse el caso de algunos todos en los que las partes no dependan literalmente de otras para existir, pero aun así formen alguna suerte de sistema debido a su disposición, como en un sistema de control.
- Por estas razones, ha resultado conveniente ampliar  $F$  y  $WF$  haciendo uso de  $F_i$ ,  $F_{mi}$  y  $F_{mf}$ , que permiten describir los fenómenos mencionados.
- A través de WGM1 y del concepto de fundamentación ampliado, puede estarse en condiciones de elaborar una ontología de los sistemas complejos.

### 10.3. Sobre los niveles

- Desde nuestro punto de vista, la noción de parte parece implicar ya en cierta medida el concepto de nivel: si  $a$  es parte de  $b$ , entonces  $a$  está en un nivel inferior a  $b$ , siempre, claro está, que no se adopte una mereología extensional.
- A través de la lógica de primer orden y los conceptos de parte y parte propia, se ha podido ofrecer una definición recursiva de nivel, que se ha denominado «nivel mereológico».
- Con el estudio de sistemas en mente, se ha desarrollado la noción de «nivel amplio», el cual engloba varios niveles mereológicos.

## 10.4. Sobre la ontología de las propiedades de la complejidad

- Se ha ofrecido una definición de sistema dinámico basada en las nociones de objeto, propiedad, relación, estructura y dinámica.
- La emergencia puede ser tratada en grados o tipos:
  - Emergencia de primer orden, cuyo arquetipo es la termodinámica.
  - Emergencia de segundo orden, cuyo arquetipo son los sistemas autoorganizados.
  - Emergencia de tercer orden, cuyo arquetipo son los fenómenos de memoria y evolución.
- El primero de estos grados se considera reducible ontológicamente, aunque quizá no epistémicamente. En cambio, las emergencias de segundo y tercer orden no son reducibles de forma ontológica.
- Se ha podido ofrecer una definición positiva de emergencia, tanto fuerte como débil, a través de los conceptos mereológicos y de fundamentación. En esta definición se establecen los tipos de entidades que intervienen, el papel que juegan los niveles y los tipos de relaciones de dependencia que pueden darse.
- Se ha observado que el concepto de causación descendente puede comprenderse haciendo uso de las condiciones de frontera, de forma que se eviten los problemas referentes a la violación del cierre causal.
- Se ha ofrecido una definición de causación descendente a través de la emergencia y el concepto de variación del espacio de estados posibles.
- La autorregulación ha sido descrita descomponiéndola en fenómenos más sencillos: variación, selección y transmisión. Se ha observado que, en general, la selección se da a través de la causación descendente, y la transmisión, por su parte, gracias a bucles de realimentación o bien entidades mediadoras como el ADN. Se han considerado, además, dos tipos de autorregulación:
  - Autorregulación relativa: se da en sistemas cuyos valores objetivo han sido fijados de forma externa.
  - Autorregulación fuerte: se puede apreciar en sistemas que, debido a una apertura termodinámica, se constituyen a sí mismos y sus valores objetivo proceden de su propia dinámica.
- Se ha ofrecido una definición de autorregulación haciendo uso del lenguaje de sistemas dinámicos, la emergencia y la causación descendente.

- Utilizando como base el concepto de sistema dinámico, y haciendo uso de todos los conceptos definidos anteriormente, se ha llegado a ofrecer una definición de sistema complejo en dos versiones:
  - Sistema complejo de primer grado: es un sistema dinámico que posee únicamente autorregulación relativa.
  - Sistema complejo de segundo grado: es un sistema dinámico que posee autorregulación fuerte, y por tanto intercambio de materia con el medio.

### 10.5. Conclusiones finales a partir del análisis de sistemas

- Fenómenos como la emergencia o la causación descendente parecen tener una estructura ontológica recurrente, que coincide en gran medida con las definiciones ofrecidas.
- Se ha observado que los tres pilares de un sistema complejo (emergencia, causación descendente y autorregulación) forman un triángulo que podría considerarse indivisible: la emergencia fuerte, por el mero hecho de estar presente, influye en el comportamiento de las partes de las que está compuesto, dando lugar a causación descendente; a su vez, esta influencia es la que posibilita o favorece la aparición de mecanismos de realimentación o similares, que forman parte del fenómeno de la autorregulación.
- Esta trabazón entre emergencia, causación descendente y autorregulación es algo que no podría darse en un sistema complejo de primer grado. Según esto podría considerarse, si se adoptara una visión restrictiva de la complejidad, que los sistemas complejos de segundo grado son, por así decir, el significado primario del concepto de complejidad.

# Bibliografía

- Alberts, Bruce y col. (2008). *Biología molecular de la célula*. 5.<sup>a</sup> ed. Trad. Mercè Durfort i Coll y Miquel Llobera i Sande. Barcelona: Omega.
- Aracil, Javier y Francisco Gordillo (1997). *Dinámica de sistemas*. Madrid: Alianza.
- Arráiz, Nailet (2001). «Quorum sensing y virulencia en *Pseudomonas aeruginosa* (Revisión)». En: *Kasmera* 29.1.
- Ashby, W. Ross (1957). *An introduction to cybernetics*. London: Chapman & Hall Ltd.
- (1962). «Principles of the Self-Organizing System». En: *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium*. Ed. por H. Von Foerster y G. W. Zopf Jr. Pergamon, págs. 255-278.
- Ayala, Francisco J. y Theodosius Dobzhansky (1983). *Estudios sobre la filosofía de la biología*. Trad. Carlos Pijuan Rotge. Barcelona: Ariel.
- Baas, Nils (2009). «New structures in complex systems». En: *The European Physical Journal Special Topics* 178.1, págs. 25-44.
- Baas, Nils y Claus Emmeche (1997). «On Emergence and Explanation». En: *Intellectica* 2.25, págs. 67-83.
- Baianu, Ion C. (2007). «Categorical Ontology of Levels and Emergent Complexity: An Introduction». En: *Axiomathes* 17.3-4, págs. 209-222.
- Baianu, Ion C., R. Brown y J. F. Glazebrook (2007). «A non-abelian, categorical ontology of spacetimes and quantum gravity». En: *Axiomathes* 17.3-4, págs. 353-408.
- Baianu, Ion C., R. Brown y J. F. Glazebrook (2007). «Categorical ontology of complex spacetime structures: the emergence of life and human consciousness». En: *Axiomathes* 17.3-4, págs. 223-352.
- Bar-Yam, Yaneer (1997). *Dynamics of complex systems*. Massachusetts: Addison-Wesley Reading.
- Bedau, Mark A. (2008). «Is Weak Emergence Just in the Mind?» En: *Minds and Machines* 18.4, págs. 443-459.
- Benítez López, Antonio (2013). *Fundamentos de inteligencia artificial: Libro tercero, Inteligencia artificial bioinspirada*. 1a edición. Madrid: Escolar y Mayo.

- Bertalanffy, Ludwig von (1950). «An Outline of General System Theory». En: *British Journal for the Philosophy of Science* 1.2, págs. 134-165.
- (1951). «General system theory; a new approach to unity of science. 1. Problems of general system theory». En: *Human biology; an international record of research* 23.4, pág. 302.
- (2007). *Teoría general de los sistemas*. Trad. Juan Almela. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Bishop, Robert C. (2005). «Downward Causation in Fluid Convection». En: *Synthese* 160.2, págs. 229-248.
- Bittner, Thomas y Barry Smith (2004). «Normalizing Medical Ontologies Using Basic Formal Ontology». En: *Proceedings of GMDS 2004*, págs. 199-201.
- Bleeksmith, Richard y Gilbert Null (1991). «Matrix representation of Husserl's part-whole foundation theory». En: *Notre Dame Journal of Formal Logic* 32 (1), págs. 87-111.
- Brown, R., J. F. Glazebrook e I. C. Baianu (2007). «A Conceptual Construction of Complexity Levels Theory in Spacetime Categorical Ontology: Non-Abelian Algebraic Topology, Many-Valued Logics and Dynamic Systems». En: *Axiomathes* 17.3-4, págs. 409-493.
- Buckley, Walter, David Schwendt y Jeffrey A. Goldstein (2008). «Society as a complex adaptive system». En: *Emergence: Complexity and Organization* 10.3. Original: 1968, pág. 86.
- Casati, Roberto y Achille C. Varzi (1999). *Parts and Places. The Structures of Spatial Representation*. Cambridge: The MIT Press.
- Chalmers, David J. (2006). «Strong and Weak Emergence». En: *The re-emergence of emergence. The emergentist hypothesis from science to religion*. Oxford University Press.
- Chatterjee, Atanu (2016). «Energy, Entropy and Complexity: Thermodynamic and information-theoretic perspectives on ageing». En: *Challenging Ageing: The anti-senescence effects of Hormesis, Environmental Enrichment, and Information Exposure*. Bentham.
- Crutchfield, J. P. y col. (1995). «Chaos». En: *Chaos and Complexity*. Ed. por R. J. Russell, N. Murphy y A. R. Peacocke. Vatican Observatory Publications, págs. 35-48.
- Deacon y col. (2003). *Evolution and Learning: The Baldwin Effect Reconsidered*. Ed. por Bruce H. Weber y David J. Depew. Cambridge: MIT Press.
- Deacon, Terrence W. (2006). «Emergence: the hole at the wheel's hub». En: *The re-emergence of emergence. The emergentist hypothesis from science to religion*. Oxford University Press.
- Deneubourg, Jean-Louis y col. (1989). «The blind leading the blind: modeling chemically mediated army ant raid patterns». En: *Journal of insect behavior* 2.5, págs. 719-725.

- El-Hani, Charbel Niño y Claus Emmeche (2000). «On some theoretical grounds for an organism-centered biology: Property emergence, supervenience, and downward causation». En: *Theory in Biosciences* 119.3, págs. 234-275.
- Emmeche, Claus, Simo Koppe y Frederick Stjernfelt (1997). «Explaining Emergence: Toward an Ontology of Levels». En: *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 28.1, págs. 83-119.
- Fine, Kit (1995). «Part-Whole». En: *The Cambridge Companion to Husserl*. Ed. por Barry Smith y David Woodruff Smith. Cambridge University Press, pág. 463.
- Floreano, Dario y Claudio Mattiussi (2008). *Bio-inspired artificial intelligence: theories, methods, and technologies*. Cambridge: The MIT press.
- Floridi, Luciano (2010). *Information: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- Gargaud, Muriel, Ricardo Amils y Henderson James Cleaves (2011). *Encyclopedia of astrobiology*. Vol. 1. New York: Springer Science & Business Media.
- Goodman, Nelson (1966). *The structure of appearance*. 2nd. Indianapolis [etc.]: The Bobbs-Merrill Company.
- Goss, Simon y col. (1989). «Self-organized shortcuts in the Argentine ant». En: *Naturwissenschaften* 76.12, págs. 579-581.
- Gulick, Robert Van (1993). «Who's in charge here? And who's doing all the work?». En: *Mental causation*. Oxford University Press.
- Heil, John y Alfred Mele (1993). *Mental Causation*. Oxford: Clarendon Press.
- Holland, John (2004). *El orden oculto. De cómo la adaptación crea la complejidad*. Trad. Esteban Torres Alexander. México: Fondo de Cultura Económica.
- Hovda, Paul (2009). «What Is Classical Mereology?». En: *Journal of Philosophical Logic* 38.1, págs. 55-82.
- Husserl, Edmund (2006b). *Investigaciones lógicas*. Vol. I. Trad. Manuel G. Morente y José Gaos. Madrid: Alianza.
- (2006a). *Investigaciones lógicas*. Vol. II. Trad. Manuel G. Morente y José Gaos. Madrid: Alianza.
- Johnson, Neil F. (2009). *Simply Complexity: A Clear Guide to Complexity Theory*. Oxford: Oneworld.
- Juarrero, Alicia (2013). «Downward Causation: Polanyi and Prigogine». En: *Tradition and Discovery* 40.3, págs. 4-15.
- Kauffman, Stuart A. (1993). *The Origins of Order Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
- Kim, Jaegwon (2006a). «Being realistic about emergence». En: *The re-emergence of emergence. The emergentist hypothesis from science to religion*. Oxford University Press.
- (2006b). «Emergence: Core Ideas and Issues». En: *Synthese* 151.3, págs. 547-559.

- Künne, Wolfgang y col. (1982). *Parts and moments: studies in logic and formal ontology*. Ed. por Barry Smith. München: Philosophia.
- Ladyman, James, James Lambert y Karoline Wiesner (2013). «What is a Complex System?» En: *European Journal for Philosophy of Science* 3.1, págs. 33-67.
- Lee, Jasmine y Lianhui Zhang (2015). «The hierarchy quorum sensing network in *Pseudomonas aeruginosa*». En: *Protein & cell* 6.1, págs. 26-41.
- Leigh, Egbert Giles (1999). *Tropical forest ecology: a view from Barro Colorado Island*. New York: Oxford University Press.
- Lejewski, Czeslaw (1981). «Ontology: what next?» En: *Language and Ontology. Proceedings of the 6th international Wittgenstein symposium*. Kirchberg & Wechsel, págs. 173-185.
- Leonard, Henry S. y Nelson Goodman (1940). «The Calculus of Individuals and its Uses». En: *Journal of Symbolic Logic* 5.2, págs. 45-55.
- Lesniewski, Stanislaw (1992). *Collected works*. Ed. por Stanislaw J. Surma y col. Warszawa, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- MacBride, Fraser (2016). «Relations». En: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Ed. por Edward N. Zalta. Winter 2016. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Maldonado, Carlos Eduardo y Nelson Alfonso Gómez Cruz (2011). *El mundo de las ciencias de la complejidad. Una investigación sobre qué son, su desarrollo y sus posibilidades*. Bogotá: Editorial Universidad del Rosario.
- Maturana, Humberto y Francisco Varela (2003). *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo*. Buenos Aires: Lumen.
- Mitchell, Melanie (2009). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford: Oxford University Press.
- Murphy, Nancey (2006). «Emergence and mental causation». En: *The re-emergence of emergence. The emergentist hypothesis from science to religion*. Oxford University Press.
- Ñeco García, Ramón Pedro (2013). *Apuntes de sistemas de control*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Ogata, Katsuhiko (1987). *Dinámica de sistemas*. Trad. José C. Pecina Hernández. Nuacalpan de Juárez: Pentice-Hall Hispanoamericana.
- Paniagua, Ricardo y col. (1998). *Citología e histología vegetal y animal*. 4.<sup>a</sup> ed. Vol. 1: Biología celular. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- Pathria, R. K. y Paul D. Beale (2011). *Statistical mechanics*. 3.<sup>a</sup> ed. Boston, Amsterdam: Elsevier/Academic Press.
- Paz, Alí José Carrillo (2011). *Sistemas automáticos de control. Fundamentos básicos de análisis y modelado*. 2.<sup>a</sup> ed. Santa Rita: Fondo Editorial UNERMB.
- Polanyi, Michael (2012). «Life's irreducible structure». En: *Emergence: Complexity & Organization* 14.4 (4), págs. 139-153.
- Poli, Roberto (1998). «Levels». En: *Axiomathes* 9.1-2, págs. 197-211.
- (2001). «The Basic Problem of the Theory of Levels of Reality». En: *Axiomathes* 12.3-4, págs. 261-283.

- Prescott, Harley y Klein (2004). *Microbiología*. Trad. Carlos Gamazo de la Rasilla e Íñigo Lasa Uzcudum. Madrid: McGraw-Hill.
- Prigogine, Ilya (2006). *El nacimiento del tiempo*. Trad. Josep María Pons. Buenos Aires: Tusquets.
- Russell, R. J., N. Murphy y A. R. Peacocke, eds. (1995). *Chaos and Complexity*. 2.<sup>a</sup> ed. Notre Dame: Vatican Observatory Publications.
- Schaffernicht, Martin (2009). *Indagación de situaciones dinámicas mediante la dinámica de sistemas*. Talca: Editorial Universidad de Talca.
- Shannon, Claude E. y Warren Weaver (1963). *The mathematical theory of communication*. 1.<sup>a</sup> ed. Urbana [etc]: University of Illinois Press.
- Simon, Herbert A. (1962). «The Architecture of Complexity». En: *Proceedings of the American Philosophical Society* 106, págs. 467-482.
- (1996). *The sciences of the artificial*. 3.<sup>a</sup> ed. Cambridge: The MIT press.
- Simon, Jonathan y Barry Smith (2004). «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*. Colonia.
- Simons, Peter M. (1982). «Three essays in formal ontology. I. The formalisation of Husserl's theory of wholes and parts». En: *Parts and moments. Studies in logic and Formal ontology*. Philosophia.
- Smith, Barry (2005a). «Against Fantology». En: *Experience and Analysis*. Ed. por Johann C. Marek y Maria E. Reicher. HPT&ÖBV, págs. 153-170.
- (2005b). «The Logic of Biological Classification and the Foundations of Biomedical Ontology». En: *Logic, Methodology and Philosophy of Science. Proceedings of the 12th International Conference*. King's College Publication, págs. 505-520.
- Smith, Barry y col. (2005). «Relations in Biomedical Ontologies». En: *Genome Biology* 6.5, R46.
- Szrednicki, Jan T. J., V. F. Rickey y J. Czelakowski (1984). *Leniewski's Systems. Ontology and Mereology*. Massachusetts: Kluwer Boston.
- Tachet, Remi y col. (2016). «Revisiting Street Intersections Using Slot-Based Systems». En: *PLOS ONE* 11.3, págs. 1-9.
- Urbaniak, Rafal (2013). *Lesniewski's Systems of Logic and Foundations of Mathematics*. Cham [etc.]: Springer.
- Varzi, Achille C. (2014). «Mereology». En: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Ed. por Edward N. Zalta. Fall 2014. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Vicente, Agustín (2001). «El principio del cierre causal del mundo físico». En: *Critica* 33.99, págs. 3-17.
- Weaver, Warren (1948). «Science and Complexity». En: *American Scientist* 36.536-544.
- Wimsatt, William C. (1972). «Complexity and Organization». En: *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association 1972*, págs. 67-86.

- Wimsatt, William C. (1994). «The Ontology of Complex Systems: Levels of Organization, Perspectives, and Causal Thickets». En: *Canadian Journal of Philosophy* 20.sup1, págs. 207-274.
- Witzany, Günther, ed. (2010). *Biocommunication in soil microorganisms*. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Wolfram, Stephen (1984). «Cellular automata as models of complexity». En: *Nature* 311.5985, pág. 419.
- (2002). *A new kind of science*. Wolfram media Champaign.
- Young, Hugh y Roger Freedman (2009). *Física universitaria*. 12.<sup>a</sup> ed. Vol. I. Trad. Victoria A. Flores Flores. México: Pearson.
- Zill, Dennis G. (2005). *Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado*. Spanish. 7<sup>a</sup>. México D.F. [etc.]: Thomson Learning.

# Anexo: Las disciplinas científicas de la complejidad

Se suele repetir con frecuencia que el estudio de los sistemas complejos constituye un campo multidisciplinar. A lo largo de la tesis se ha hecho referencia a ciertas disciplinas y conceptos científicos, tales como entropía, energía, información, etc. Se intentará en las secciones que siguen dar cuenta de los fundamentos de algunas de estas disciplinas para poder aclarar algunas de las afirmaciones que se han presentado hasta el momento.

## .1. Termodinámica y mecánica estadística

Se suele caracterizar la termodinámica de manera muy general diciendo que es la rama de la física que estudia el calor, el trabajo y la energía (Young y Freedman 2009, pág. 646), o la energía y sus interacciones con la materia (Mitchell 2009, pág. 41), o algo similar. De una forma más precisa, se puede definir como la disciplina que trata los sistemas termodinámicos, que consisten en un conjunto de objetos que puede considerarse unitario y que intercambia energía con el entorno. Estas relaciones de energía son descritas a través de los conceptos de calor ( $Q$ ) y trabajo ( $W$ ).

Por un lado, el calor es una transferencia de energía que se da en virtud de la diferencia de temperatura de dos cuerpos. No es correcto hablar, por tanto, de la cantidad de calor contenida en un cuerpo, sino que éste es más bien un flujo de energía. Así, cuando se introduce una cucharilla fría en el café caliente, la cucharilla recibe energía en virtud de esta diferencia de temperatura. (Young y Freedman 2009, págs. 582-3)

Por otro lado, el trabajo se define como el producto de la fuerza por el desplazamiento. Por ejemplo, una persona empujando un coche con una fuerza  $F$  a través de una distancia  $s$ , realizará un trabajo  $W = F \cdot s$ . (Young y Freedman 2009, pág. 182)

Los flujos de calor y trabajo son lo que puede cambiar el estado de un sistema termodinámico. Uno de estos sistemas puede tanto recibir un trabajo como realizarlo, y también, emitir calor o recibirlo. (Young y Freedman 2009, pág. 647) El estado de un sistema queda reflejado por parámetros como el volumen, la presión, la temperatura y la energía.

Las propiedades esenciales de estos sistemas han quedado descritas a través de lo que finalmente se ha llamado las «tres leyes de la termodinámica». La conocida como «ley cero» hace uso del concepto de equilibrio térmico. Dos cuerpos que están en equilibrio térmico cuando su interacción ya no produce cambios en el sistema. En el ejemplo de la cucharilla, si el café no es consumido, llegará un momento en el que el café y la cucharilla tendrán la misma temperatura, no influyendo más el uno en el otro. Pues bien, imagínese que se tienen tres sistemas  $A$ ,  $B$  y  $C$ , que no están en equilibrio térmico. Se ponen  $A$  y  $B$  en contacto simultáneamente con  $C$ , pero no entre ellos, de modo que lleguen al equilibrio térmico con él. Tras esto se retira el contacto de  $A$  y  $B$  con  $C$ , y se ponen en contacto  $A$  y  $B$  entre sí. Pero ya no sucede nada: ni  $A$  ni  $B$  sufren más cambios. (Young y Freedman 2009, págs. 571-2) Este fenómeno es el que describe la ley cero de la termodinámica, y que puede expresarse así:

if two systems are in thermal equilibrium with a third they are in thermal equilibrium with each other. (Bar-Yam 1997, pág. 59)

La primera ley de la termodinámica establece que si hay transferencia de calor y trabajo, la energía interna del sistema queda definida mediante la siguiente ecuación:  $\Delta U = Q + W$ .<sup>1</sup>

Es decir, que el incremento de la energía es el resultado de la transferencia de calor y trabajo. Esta ecuación expresa la idea de que, «en general, cuando se agrega calor  $Q$  a un sistema, una parte de esta energía agregada permanece en el sistema, modificando su energía interna [...]; el resto sale del sistema cuando éste efectúa un trabajo  $W$  contra su entorno.» (Young y Freedman 2009, pág. 652)

La segunda ley puede enunciarse, entre otras maneras, así: «Es imposible que un sistema efectúe un proceso en el que absorba calor de una fuente de temperatura uniforme y lo convierta totalmente en trabajo mecánico, terminando en el mismo estado en que inició.» (Young y Freedman 2009, pág. 682) Esta ley se basa en el hecho de que lo que llamamos energía interna del sistema a un nivel macroscópico, está compuesto a nivel microscópico de las energías cinéticas y potenciales de las partículas que conforman los cuerpos. Los movimientos de estas partículas son aleatorios, y dado «que no podemos controlar los movimientos de moléculas individuales, no podemos convertir todo este movimiento aleatorio otra vez en movimiento organizado. Podemos convertir una parte». (Young y Freedman 2009, pág. 683) Es decir, que transformar el calor de la fuente en trabajo mecánico sería organizar de nuevo las partículas, pues el movimiento del cuerpo no es sino el movimiento organizado, en cierta dirección, de dichas partículas. Pero al tener que tratar estas partículas en bloque, y no individualmente, sólo se puede organizar una parte de ellas, quedando siempre un remanente de energía que no puede ser convertida en trabajo.

Esta segunda ley puede ser expresada de otra forma, quizá más conocida, si se ahonda en los conceptos de desorden y entropía. En primer lugar, se ha de señalar que los procesos

---

<sup>1</sup>También puede encontrarse la ecuación con la forma  $\Delta U = Q - W$ , según el criterio de signos que se utilice para expresar el sentido del trabajo (desde el sistema o hacia el sistema).

termodinámicos poseen una dirección o sentido. Por ejemplo, al introducir unos hielos en un líquido caliente, el calor fluye desde el líquido a los hielos, y no al revés.<sup>2</sup> Este sentido de los procesos está relacionado con el orden y el desorden. Como se ha visto, el aumento de energía de un sistema conlleva el aumento de aleatoriedad del movimiento de sus partículas, y por tanto, de su desorden. Si se lanza al aire un puñado de tarjetas con las letras del alfabeto, su tendencia es caer desordenadas y no en orden alfabético. Esto es así porque, de todas las posibles combinaciones, sólo una consiste en la fila de cartas ordenadas una detrás de otra, y todas las demás posibilidades consisten en distintos desórdenes (cartas tumbadas, apiladas, formando dibujos erráticos, etc). Esto sucede porque naturalmente los procesos tienden al desorden, y si se quiere introducir orden en ellos, se ha de realizar un trabajo. Como enuncia la segunda ley, siempre queda un remanente de energía que no puede ser convertida en trabajo debido al desorden de las partículas. Es decir, que una vez introducido este desorden, ya no es posible deshacerse de él: es por esto por lo que los procesos naturales son irreversibles.

Para expresar de forma cuantitativa este desorden, se emplea el concepto de entropía. El incremento de la entropía se calcula mediante la siguiente fórmula:  $\Delta S = \frac{Q}{T}$ , siendo  $T$  la temperatura del sistema. La fórmula tiene el siguiente sentido:

Una temperatura más alta implica mayor aleatoriedad de movimiento. Si la sustancia inicialmente está fría, con poco movimiento molecular, la adición de  $Q$  causa un aumento fraccionario considerable en el movimiento y la aleatoriedad molecular. Pero si la sustancia ya está caliente, la misma cantidad de calor aumenta relativamente poco el mayor movimiento molecular que ya existe. Así, el cociente  $Q/T$  es una caracterización adecuada del aumento de aleatoriedad o desorden, cuando hay flujo de calor hacia un sistema. (Young y Freedman 2009, pág. 691)

En un proceso irreversible la entropía siempre aumenta. En un proceso reversible idealizado, el cambio de entropía es cero. (Young y Freedman 2009, pág. 695) Como todos los procesos naturales son irreversibles, se colige que en todo proceso natural la entropía siempre aumenta. Estas ideas son recogidas por la formulación alternativa de la segunda ley de la termodinámica en términos de entropía: «Si se incluyen todos los sistemas que participan en un proceso, la entropía se mantiene constante, o bien, aumenta. En otras palabras, no puede haber un proceso en el que la entropía total disminuya, si se incluyen todos los sistemas que participan en el proceso.» (Young y Freedman 2009, pág. 696)

Pese a que en ocasiones se ha hecho referencia a las partículas que componen los sistemas con fines explicativos, la termodinámica como tal sólo trata con propiedades macroscópicas de la materia. La disciplina de la física encargada de estudiar el origen microscópico de

---

<sup>2</sup>A pesar de que todos los procesos naturales tienen cierta dirección «preferida», y por tanto son irreversibles, se podría considerar, al menos de manera idealizada, ciertos procesos reversibles. (Young y Freedman 2009, pág. 674)

esas propiedades se denomina «mecánica estadística». Esta disciplina estudia la aparición de las leyes termodinámicas a partir de la mecánica de Newton, pero utilizando métodos estadísticos, ya que trata con cantidades enormes de partículas, las cuales no pueden ser descritas individualmente.

Para determinar un macroestado se utilizan, en mecánica estadística, los parámetros  $N$ ,  $V$  y  $E$  (número de partículas, volumen y energía). Para un determinado macroestado, el número de microestados que dan lugar a él es muy alto. Es decir, hay muchas maneras de distribuir la energía total del sistema entre las  $N$  partículas que lo constituyen. Para nombrar el número de microestados posibles de un sistema se utiliza la siguiente expresión:  $\Omega(N, V, E)$ . En ausencia de constricciones, se asume que cada realización del macroestado (que es un conjunto de microestados) es igual de probable. (Pathria y Beale 2011, pág. 2)

A la hora de explicar el contacto entre termodinámica y mecánica estadística se puede utilizar un ejemplo como el siguiente (Pathria y Beale 2011, págs. 3-5):

Se tiene un sistema  $A^0 (\equiv A_1 + A_2)$ .  $A_1$  está definido por  $N_1, V_1, E_1$ ;  $A_2$  está definido por  $N_2, V_2, E_2$ . Ambos subsistemas están en contacto entre sí e intercambian energía. La única condición que restringe este intercambio de energía es que la suma total de energía  $E_0 = E_1 + E_2$  se mantiene constante. La pregunta que surge entonces es, ¿en qué valor de  $E^0$  llega el sistema  $A^0$  al equilibrio, es decir, al estado en que ya no se producen más cambios? La respuesta es: en el valor que esté detrás del macroestado que es sustentado por un mayor número de microestados, que es el macroestado más probable. Es decir, hay muchas posibles formas de repartir la energía de un sistema. Dentro de esas formas, hay grupos equivalentes en el sentido de que, aun suponiendo diferentes ordenaciones de partículas, dan lugar al mismo estado global o macroestado. Y, dentro de estos macroestados, existe uno que es aquél al que más microestados «van a parar». Éste es, entonces, el estado más probable, y es en el que el sistema alcanzará el equilibrio.

De este sistema son ciertas las siguientes igualdades:

$$\Omega_1(E_1)\Omega_2(E_2) = \Omega_1(E_1)\Omega_2(E^0 - E_1) = \Omega^0(E^0, E_1)$$

A partir de esta función  $\Omega^0$ , y empleando una ecuación termodinámica que relaciona entropía, energía y temperatura, se obtiene la siguiente ecuación establecida por Boltzmann

$$\frac{\Delta S}{\Delta(\ln\Omega)} = \frac{1}{\beta T} = \text{constante}$$

más conocida en la siguiente forma, debida a Planck,

$$S = k \ln \Omega$$

Esta última fórmula resulta esencial, pues relaciona las perspectivas macroscópica y microscópica, ya que establece una proporción entre la entropía ( $S$ ), que pertenece a la termodinámica, y el número de microestados posibles de un sistema ( $\Omega$ ), que pertenece a la mecánica estadística. Así, se puede reinterpretar de nuevo la segunda ley de la termodinámica: cuanto mayor es  $\Omega$ , menos predecible es el sistema y más aumenta el

desorden, de modo que menos cantidad de energía estará disponible para su conversión en trabajo. Este puente tendido entre los aspectos «macro» y «micro» resulta clave en la demostración matemática de las leyes de la termodinámica a partir de métodos estadísticos, lo cual dota a la termodinámica de una sólida base que va más allá de lo experimental, pues se deducen las propiedades de los cuerpos y su comportamiento a partir de su estructura misma.

## .2. Teoría de la información

Se ha venido afirmando que los sistemas complejos obtienen información del entorno, o que están compuestos de agentes que se comunican entre sí, es decir, intercambian información. Dada la centralidad de este concepto, se hace ineludible un examen del mismo. Se ha de tener presente, ante todo, la polisemia del concepto «información». Esto hace que se pueda hablar de información matemática, semántica, biológica, física, económica, etc. (Floridi 2010) Es decir, en cada contexto, atendiendo a unos determinados fenómenos, la información puede adoptar aspectos muy diversos, lo que dificulta la obtención de una «definición universal». Sin embargo, se puede tratar de dar una caracterización muy general apelando a ciertos fenómenos comunes muy básicos.

Luciano Floridi ofrece la siguiente definición de «información semántica», la cual se suele proponer como estándar en la actualidad (Floridi 2010, pág. 21):

$\sigma$  es una instancia de información, entendida como contenido semántico, *syss*

- $\sigma$  consiste en  $n$  datos, para  $n \geq 1$ ;
- los datos están bien formados;
- los datos bien formados poseen significado.

De acuerdo con esta definición, la información está compuesta de datos, que siguen una sintaxis (están bien formados) y una semántica (poseen significado). El concepto de dato se comprende mediante una interpretación diafórica, es decir, basada en la diferencia o falta de uniformidad. (Floridi 2010, pág. 23) Según Floridi, esta falta de uniformidad puede darse, según las asunciones ontológicas y epistemológicas que se arrastren, entre aspectos del mundo real (refiriéndose a la fuente de esta diferencia «en bruto», sin interpretar), entre estados de un sistema físico (como la temperatura o nivel de carga de una batería) o entre símbolos (código binario, alfabeto latino, griego, etc.). El dato, se entiende, sería este elemento que se resalta sobre otros precisamente por ser distinto de ellos. Por ejemplo, el código binario posee dos símbolos diferentes («0» y «1», los cuales serían los datos) que han de ser ordenados de una manera concreta y tienen un significado (por ejemplo, un carácter del alfabeto o una instrucción para el procesador de un computador). La información semántica no tiene por qué ser exclusivamente lingüística, de modo que también abarca casos como el de los diagramas o los mapas.

Esta noción de información semántica parece querer plasmar la intuición de que los datos, para ser informativos, han de «hablar de algo» o significar algo. No basta con que sigan un orden concreto si no son capaces de transmitir un aspecto de un estado de cosas o un conjunto de instrucciones. Y es que este tipo de información puede ser tanto «factual» (describe cierta situación) como «instruccional» (da órdenes o instrucciones acerca de acciones, y por tanto no es verdadera ni falsa). (Floridi 2010, pág. 34) De este modo, el sentido del concepto «semántico» se toma en un sentido relativamente amplio, yendo más allá de la verdad y la falsedad y abarcando también, por ejemplo, ciertos aspectos performativos y pragmáticos.

Otra de las formas en las que se puede entender la información como un conjunto de datos estructurados es la información «ambiental» (*environmental*). (Floridi 2010, págs. 32-33) La información ambiental requiere dos sistemas,  $a$  y  $b$ , relacionados de tal forma que el hecho de que uno posea cierta característica  $F$  está correlacionado con el hecho de que el otro sistema posea otra característica  $G$ , de tal forma que esa conexión informe al observador de que  $b$  es  $G$ . Por ejemplo, un árbol ( $a$ ) y los anillos de su tronco ( $b$ ) están relacionados de tal forma que el número de anillos ( $F$ ) indica la edad ( $G$ ) del árbol. La diferencia respecto de la información como contenido semántico es que la ambiental puede no requerir semántica alguna, pues puede consistir simplemente en patrones de datos relacionados como meras diferencias físicas; además, este tipo de información puede ser independiente de un productor o informador inteligente.

A través de estas dos concepciones de la información, que pueden considerarse complementarias, se cubre gran parte de lo que se suele concebir habitualmente como información. Ambas se basan en la idea de los datos estructurados pero son algo más específicas; sin embargo, son lo suficientemente generales como para aplicarse a una gran cantidad de situaciones. La idea de los datos estructurados con contenido semántico sirve para caracterizar la comunicación entre humanos, agentes como los concebidos por Holland, computadores, etc. Su contrapartida ambiental, que deja de lado lo semántico, cubre los casos que quedan libres, como ciertas comunicaciones entre animales, huellas, rastros y síntomas. Pueden servir, por tanto, como una base muy general que ha de ser refinada para captar el significado de la información en las diversas disciplinas.

Uno de estos significados de «información», que se ha empleado a través de autores como Mitchell o Johnson, y que es el más habitual a la hora de tratar con la complejidad debido a su carácter cuantitativo, es el que Floridi etiqueta como «teoría matemática de la información» (Floridi 2010, 37 y ss.) aunque generalmente suele nombrarse como «teoría de la información».<sup>3</sup> Esta visión de la información proviene de los trabajos de Claude Shannon y el ya citado Warren Weaver<sup>4</sup> (Shannon y Weaver 1963), y su forma se basa en el la forma del esquema presentado en la figura 1.<sup>5</sup>

<sup>3</sup>En adelante se preferirá la denominación de teoría matemática pues, dada la polisemia mencionada, queda claro que ésta no es una «teoría general de la información».

<sup>4</sup>Supra subsección 2.2.5, pág. 16.

<sup>5</sup>Imagen tomada de Shannon y Weaver 1963, pág. 34.

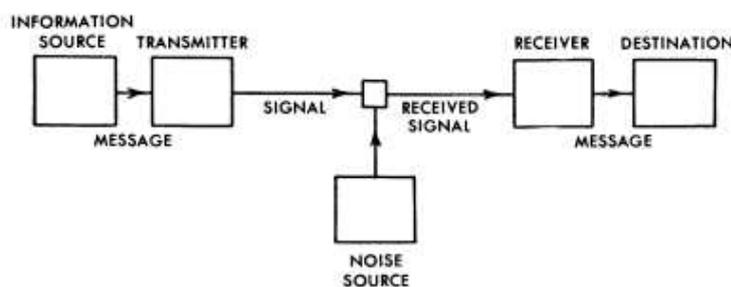


Figura 1: Esquema de Shannon y Weaver

Las nociones más básicas son las de fuente, mensaje, receptor, código y canal. Así, la definición de información podría ser enunciada como «la serie de mensajes que la fuente envía al receptor, a través de un determinado canal y utilizando cierto código». Estos mensajes son seleccionados dentro de un conjunto de mensajes posibles. (Mitchell 2009, págs. 52-54) Por ejemplo, una frase de un lenguaje humano es una de las posibles combinaciones de palabras que componen el vocabulario de dicho lenguaje. Así, la cantidad de información<sup>6</sup> de una cadena se expresa a través de la siguiente ecuación

$$I(s) = -\log(P(s))$$

siendo  $P(s)$  la probabilidad de ocurrencia del mensaje dentro del conjunto de mensajes posibles. Por tanto, los mensajes con una alta probabilidad contienen menos información que aquéllos con baja probabilidad. (Bar-Yam 1997, pág. 216)

La información está relacionada con la «incerteza» o falta de conocimiento acerca del mensaje recibido, que en cierto sentido es su inversa. En el caso límite de que el mensaje que se reciba ya se conozca, éste no aportará información alguna, y por tanto el nivel de incerteza eliminado por ese mensaje será nulo. Por ejemplo, recordando las reflexiones de Frege, una tautología como «el lucero vespertino es el lucero vespertino» no aportará información; sí lo hará, en cambio, un enunciado como «el lucero matutino es el lucero vespertino» (en el caso, claro, de que se desconozca esta identidad). De esta manera, cuanto más información aporta un mensaje, más alternativas se eliminan (dentro del conjunto de mensajes posibles) y por ello más incerteza elimina. Es decir, que un mensaje de tres *bits* eliminará esa cantidad de incerteza. (Floridi 2010, pág. 41)

El sentido intuitivo de estos conceptos matemáticos se puede entender como sigue. Shannon estaba principalmente interesado en la economía de la capacidad de la infraestructura telefónica, y 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,

<sup>6</sup>En ocasiones denominada entropía o «entropía de Shannon». (Ladyman, Lambert y Wiesner 2013, págs. 11-12) Como se verá en la subsección siguiente, este concepto de información tiene que ver con la entropía termodinámica.

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, por lo general, en el código empleado 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.

Cuando la combinación de caracteres (o pulsos eléctricos, o señales de humo...) es aleatoria, se dice que la cantidad de información de ese mensaje es alta; cuando la combinación es muy repetitiva, se dice que la cantidad de información es baja. 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. En un texto corriente como éste, pese a que algunas palabras se repiten más que otras (preposiciones, conjunciones, etc.), la distribución de éstas es más o menos uniforme, y por lo tanto se acerca a lo aleatorio, dando lugar a un valor alto de información según la ecuación citada. Sin embargo, dado el mensaje tan fácilmente comprimible del ejemplo anterior, la cantidad de información sería realmente baja (puesto que en una repetición monótona, todos los elementos, en este caso cadenas «abcd», tienen la máxima probabilidad de aparecer).

Del esquema propuesto por Shannon parece desprenderse que para que se dé la comunicación, tanto el receptor como el emisor deben conocer ciertas reglas que compondrían el código. Si el emisor desconociera las reglas, no podría enviar mensajes; si el receptor no las conociera, no podría procesar y utilizar la información. A propósito del modelo *Echo* de Holland (ver sección 2.3.1) 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 respecto del conocimiento. 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. Sin embargo, si se atiende a los casos de información ambiental parecería encontrarse un contraejemplo a este esquema general. En efecto, no parece posible que el tronco del árbol, al producir sus anillos, conozca código alguno, ni que lo haga el conejo que deja huellas en la nieve, o la enfermedad que produce fiebre. Si se quiere introducir estos casos en el esquema, habría que aceptar que existen algo así como «códigos implícitos» que uno de los implicados en la comunicación ha de interpretar a base de inferencias, mientras que el otro simplemente produce datos de forma, generalmente, involuntaria.

### .2.1. Información y entropía

Por un lado, la relación de la información con la termodinámica se da a través de la aleatoriedad y la probabilidad. Como se ha visto, la entropía puede verse como una medida del orden y el desorden en las partículas que componen un sistema. Pero esta misma idea también puede ser aplicada a los caracteres que componen una cadena, o a las cadenas que componen un mensaje: un mensaje muy estructurado contiene una menor cantidad de entropía, y por tanto, según la ecuación, una menor cantidad de información. Es decir, que de la misma manera que, en un sistema físico, cuanto mayor es la entropía menor es la cantidad de energía disponible para realizar un trabajo, en la teoría de la información cuanto mayor es la entropía (y por tanto la cantidad de información) menor es la incerteza. (Floridi 2010, págs. 46-47)

Por otro lado, la conexión entre ambas disciplinas puede verse como un suceso histórico, resultado de los sucesivos intentos de solución de un problema. El problema originario que llevará al uso de la noción de información en la termodinámica 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 2009, págs. 43-45)

En 1929, Leó Szilárd 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 Szilárd, esto produce más entropía que la que decrece ordenando las partículas, de modo que la segunda ley se cumple dentro del sistema. (Mitchell 2009, pág. 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 Szilárd: 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 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.