CAPÍTULO 1

SISTEMA

Toda ciencia estudia sistemas de algún tipo, ya sean naturales (físicos, químicos, biológicos o sociales) o artificiales (técnicos). Además, la mayoría de las ciencias no estudia otra cosa que sistemas. Así, la biología estudia biosistemas, la sociología sociosistemas y la tecnología tecnosistemas. La física parece ser la única ciencia que investiga no solo sistemas —como los átomos y los campos a gran escala—, sino también cosas supuestamente simples o elementales, como los electrones y los fotones. Aun así, los físicos reconocen que cada una de esas cosas básicas es un componente de algún sistema.

Hasta hace poco, cada tipo de sistema se estudiaba por separado. Hace unas cuatro décadas, varios especialistas unieron esfuerzos para emprender diversas iniciativas interdisciplinarias, como la investigación operativa y la cibernética. El éxito de estas empresas sugirió a algunos investigadores que era posible un enfoque unificado para los problemas de distintos campos. Señalaron que: (a) existen ciertos conceptos y principios estructurales que parecen aplicarse a sistemas de muchos tipos, y (b) hay algunas estrategias de modelado —en particular el enfoque del *espacio de estados*— que parecen funcionar en todas partes.

La disciplina que pretende desarrollar tal enfoque unificado suele llamarse **"teoría general de sistemas"** (Bertalanffy, 1950, 1958; Boulding, 1956). Paradójicamente, no se trata de una sola teoría, sino de todo un conjunto de teorías —teoría de autómatas, teoría de sistemas lineales, teoría de control, teoría de redes, dinámica lagrangiana general, etc.— unificadas por un marco filosófico (Bunge, 1974c, 1977c). Llamaremos **sistemismo** a este conjunto de teorías que se centran en las características estructurales de los sistemas y, por tanto, pueden atravesar las barreras —en gran parte artificiales— entre las disciplinas. El sistemismo tiene dos motivaciones relacionadas: una cognitiva y otra práctica. La motivación cognitiva o teórica del sistemismo es, por supuesto, el deseo de descubrir similitudes entre sistemas de todo tipo a pesar de sus diferencias específicas —por ejemplo, entre los sistemas de control de temperatura corporal y los termostatos de los hornos—. La motivación práctica del sistemismo es la necesidad de enfrentarse a los sistemas enormes y multifacéticos característicos de las sociedades industriales —como las redes de comunicación, las fábricas, los hospitales y los ejércitos—. Esta complejidad, en particular la variedad de componentes de dichos sistemas, rompe las fronteras tradicionales entre disciplinas y exige un enfoque interdisciplinario.

CAPÍTULO 1

Obsérvese la diferencia entre el científico, ingeniero o científico social convencional, por un lado, y el "especialista" en sistemas (en realidad un generalista), por el otro. Mientras que los primeros practican o aplican alguna ciencia particular, el experto en sistemismo resta importancia a la física (química, biología o sociología) de sus sistemas, centrándose en cambio en su estructura y comportamiento.

Además, se interesa especialmente en duplicar o imitar (modelar o simular) el comportamiento de un sistema dado (por ejemplo, una persona) mediante otro de tipo diferente (por ejemplo, un autómata de reconocimiento de patrones). Esto es válido no solo para el matemático que adopta el sistemismo como un pretexto honorable para jugar con estructuras abstractas sin una preocupación seria por los problemas prácticos de la ingeniería o la gestión; también se aplica al sistemista que busca resolver problemas concretos, como modelar y simular un sistema de pastoreo o una universidad.

El método empleado por el teórico de sistemas es el modelado matemático y la verificación experimental (o al menos computacional) de los modelos de sistemas. Ambos forman parte, por supuesto, del método científico. Lo peculiar del modo en que procede el experto en sistemismo es que, lejos de incorporar leyes específicas (por ejemplo, químicas) en su modelo, busca construir una **caja negra**, una **caja gris** o un modelo cinemático libre de detalles sobre los materiales que componen el sistema, lo suficientemente general como para abarcar algunos de los aspectos globales de la organización y del comportamiento del sistema en algunos de sus niveles. Así, el método científico se da por supuesto: lo que se enfatiza es el enfoque general o interdisciplinario en contraste con el enfoque específico o disciplinario. En otras palabras, el experto en sistemismo es un *"todólogo"*, un cuasi filósofo, si no un filósofo completo.

El sistemismo no es exactamente lo mismo que el **análisis de sistemas**, una noción muy difundida, poco definida y a veces controvertida. El análisis de sistemas también utiliza el método científico cuando se aplica de manera seria, pero, a diferencia del sistemismo, no se interesa particularmente en restar importancia a las peculiaridades de los componentes del sistema considerado. Lo que sí enfatiza es que, dado que estudia sistemas de múltiples niveles y dimensiones —como los ecosistemas o los sistemas de transporte—, debe adoptar diversos puntos de vista en distintos niveles.

Por ejemplo, los hospitales no son solo edificios con equipamiento médico, sino también **sistemas sociales**, cuyos componentes incluyen al personal médico y a los pacientes, y que además son subsistemas de un sistema social más amplio, el sistema de atención médica, el cual, a su vez, es un subsistema de una sociedad. La novedad del análisis de sistemas reside menos en sus métodos que en los objetos que estudia: **sistemas hombre-artefacto complejos** que nunca antes se habían abordado de manera científica. A diferencia del sistemismo, el análisis de sistemas no se interesa en construir modelos extremadamente generales; su objetivo es, más bien, elaborar diagramas de flujo…

SISTEMA

... diagramas de flujo, diagramas de red, y ocasionalmente modelos matemáticos específicos que explican, si es posible, no solo la estructura y cinemática del sistema, sino también su **dinámica**, permitiendo así comprender cómo funciona y cómo falla, y por lo tanto, cómo puede ser reparado. (Para un relato hilarante de las payasadas de los sistemas, véase Gall (1977)).

La **sistemología**, o teoría general de sistemas, es un campo de investigación científica y tecnológica y de considerable interés para la filosofía. Debido a su generalidad, tiene una superposición considerable con la ontología o metafísica, concebida tanto en el sentido tradicional prehegeliano como en nuestro propio sentido de ontología científica (Bunge, 1973a, 1977a). Tanto los expertos en sistemología como los ontólogos están interesados en las propiedades comunes a todos los sistemas, independientemente de su constitución particular, y ambos están intrigados por las peculiaridades de las teorías extremadamente generales, que son metodológicamente muy diferentes de las teorías específicas (Bunge, 1973a, 1977c).

Las principales diferencias entre la sistemología y la ontología parecen ser estas: (a) mientras que los teóricos de sistemas dan por sentados ciertos conceptos —por ejemplo, los de propiedad, posibilidad, cambio y tiempo—, los ontólogos no dan nada por sentado, excepto la lógica y las matemáticas; (b) mientras que los teóricos de sistemas a menudo se interesan en los detalles de los acoplamientos de los componentes de un sistema, los ontólogos rara vez lo hacen; (c) mientras que los teóricos de sistemas centran su atención en modelos de entrada-salida de sistemas que están en gran medida a merced de su entorno, los ontólogos también están interesados en los sistemas libres (en cuyo aspecto no difieren de los físicos); (d) mientras que los teóricos de sistemas están principalmente interesados en modelos deterministas (o más bien no estocásticos) —en parte porque los suyos son objetos a gran escala—, los ontólogos también están interesados en los estocásticos; y (e) mientras que algunos teóricos de sistemas centran su atención en la búsqueda de analogías entre sistemas de diferentes tipos, y particularmente en diferentes niveles, los ontólogos están interesados primariamente en analizar y sistematizar conceptos referidos a todo tipo de sistema.

En este capítulo propondremos una serie de definiciones y principios concernientes a los sistemas concretos en general. Estas ideas se utilizarán en capítulos sucesivos, donde se estudiarán ciertos géneros de sistemas. Los detalles sobre los modelos matemáticos de sistemas se encuentran en los dos apéndices.

I. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. Agregado y Sistema

Un **agregado** o ensamblaje es una colección de elementos no unidos por

CAPÍTULO I

... vínculos, y por lo tanto carece de integridad o unidad. Los agregados pueden ser conceptuales o concretos (materiales). Un **agregado conceptual** es un conjunto. (Pero no todo conjunto es un agregado conceptual: un conjunto equipado con una estructura es un sistema conceptual). Un **agregado concreto** o material, por otro lado, es una cosa compuesta cuyos componentes no están acoplados, enlazados, conectados o unidos, como un campo constituido por dos campos superpuestos, una constelación celeste o una muestra aleatoria de una población biológica.

Dado que los componentes de un agregado no interactúan —o no interactúan apreciablemente—, el comportamiento de cada uno es **independiente** del comportamiento de los demás. En consecuencia, la historia del agregado es la **unión** de las historias de sus miembros. Por otro lado, los componentes de un sistema concreto están vinculados, de donde se sigue que la historia del conjunto difiere de la unión de las historias de sus partes. Tomaremos esta última afirmación como una versión precisa del lema difuso de la metafísica holística: **El todo es mayor que la suma de sus partes**. Pero iremos mucho más allá de esta caracterización de la **totalidad** o **sistemología**. Para este fin, utilizaremos algunos conceptos matemáticos elementales, así como una serie de nociones comunes —como las de cosa, propiedad y tiempo— que han sido clarificadas en nuestro volumen complementario (Bunge, 1977a).

Un **sistema**, entonces, es un objeto complejo cuyos componentes están **interrelacionados** en lugar de estar sueltos. Si los componentes son conceptuales, también lo es el sistema; si son concretos o materiales, entonces constituyen un sistema concreto o material. Una teoría es un sistema conceptual, una escuela es un sistema concreto de tipo social. Estos son los únicos reinos de sistemas que reconocemos: **conceptual** y **concreto**. No tenemos utilidad para los sistemas mixtos, como el "mundo 3"de Popper, supuestamente compuesto por objetos conceptuales, como teorías, así como objetos concretos, como libros (Popper, 1968; Popper y Eccles, 1977). No lo hacemos porque, para poder hablar de la asociación o combinación de dos elementos, debemos especificar el vínculo u operación de asociación. Y, mientras que las teorías matemáticas especifican la forma en que se combinan los elementos conceptuales, y las teorías ontológicas y científicas se encargan de la combinación de elementos concretos, ninguna teoría conocida especifica la manera en que los elementos conceptuales podrían combinarse con los concretos —y ninguna experiencia sugiere que tales híbridos existan.

Cualquiera que sea su reino —conceptual o concreto—, se puede decir que un sistema tiene una **composición** definida, un **entorno** definido y una **estructura** definida. La **composición** de un sistema es el conjunto de sus componentes; el **entorno**, el conjunto de elementos con los que está conectado; y la **estructura**, las relaciones entre sus componentes, así como entre estos y el...

SISTEMA

... entorno. Por ejemplo, una teoría está compuesta por proposiciones o enunciados; su entorno es el cuerpo de conocimiento al que pertenece (por ejemplo, álgebra o ecología); y su estructura es la relación de implicación o consecuencia lógica. La fusión de estos tres elementos es un **sistema proposicional**, es decir, un sistema Σ compuesto por un conjunto P de proposiciones, incrustado en un cierto cuerpo conceptual B, y unido por la relación $\vdash$ de implicación: en resumen, $\Sigma = \langle P, B, \vdash\rangle$. Y la composición de una escuela es la unión de su personal y alumnos; el entorno es el medio natural y social; y la estructura consiste en las relaciones de enseñanza y aprendizaje, de gestión y de ser gestionado, entre otras. El entorno debe incluirse en la descripción de un sistema porque el comportamiento de este último depende críticamente de la naturaleza de su medio. Pero, por supuesto, en el caso del universo, el entorno está vacío, al igual que en el caso de la importante ficción conocida como la **partícula libre** (o campo).

Una forma de caracterizar el concepto general de un sistema es la siguiente. Sea T un conjunto no vacío. Entonces la terna ordenada $\Sigma = \langle C, E, S\rangle$ es (o representa) un sistema sobre T si C y E son subconjuntos mutuamente disjuntos de T (es decir, $C \cap E = \emptyset$), y S es un conjunto no vacío de relaciones en la unión de C y E. El sistema es conceptual si T es un conjunto de elementos conceptuales, y concreto (o material) si $T \subseteq \mathcal{T}$ es un conjunto de entidades concretas, es decir, cosas. Sin embargo, lo anterior no es una definición *propia*, porque no nos dice qué es exactamente la pertenencia de las coordenadas C, E y S de la terna ordenada. Por lo tanto, debemos definir las nociones de composición, entorno y estructura de una cosa.

1.2. Sistema Concreto: Definición

Comencemos por definir la composición de un sistema. Un sistema social es un conjunto de animales vinculados socialmente. Los cerebros de tales individuos son partes de estos últimos, pero no califican como miembros o componentes de un sistema social porque no entran de forma independiente en las relaciones sociales: solo los animales completos pueden mantener relaciones sociales. En otras palabras, la composición de un sistema social no es la colección de sus partes, sino solo el conjunto de sus **átomos**, es decir, aquellas partes que son socialmente conectables. Esta noción particular de composición es la de **composición atómica** o **A-composición** para abreviar. Se definirá así: La **A-composición** (o composición en el nivel A) de una cosa x es el conjunto de partes de x que pertenecen a A. En símbolos: sea $A \subseteq \mathcal{T}$ una clase de cosas y sea x una cosa (es decir, $x \in \mathcal{T}$). Entonces la composición (absoluta) de x es el conjunto de sus partes, es decir,

CAPÍTULO I

$$\mathcal{P}(x) = \{y \in \mathcal{T} \mid y \subset x\},$$

donde '$y \subset x$' designa z es una parte de x". Y la **A-composición** de x es el conjunto de sus A-partes:

$$\mathcal{P}_A(x) = \mathcal{P}(x) \cap A = \{y \in A \mid y \subset x\}.$$

Introduzcamos a continuación el concepto de **vínculo**, **conexión** o **acoplamiento** entre los componentes de una cosa. Debemos distinguir entre una mera **relación**, como la de ser mayor, y una **conexión**, como la de ejercer presión. A diferencia de una mera relación, una conexión marca alguna diferencia en sus relacionados. Es decir, dos cosas están conectadas solo si al menos una de ellas actúa sobre la otra, donde la acción no necesariamente consiste en provocar algo, sino que puede consistir en **suprimir o abrir ciertas posibilidades**.

A su vez, decimos que una cosa **actúa** sobre otra si modifica la línea de comportamiento, o trayectoria, o historia de esta última. La acción de la cosa a sobre la cosa b se simboliza:

$$a \triangleright b.$$

Si una cosa actúa sobre otra y esta última no reacciona, la primera se llama el **agente** y la segunda el **paciente**. Si ni la acción ni la reacción son nulas, se dice que las cosas **interactúan**. Finalmente, dos cosas están **conectadas** (o acopladas, o vinculadas, o unidas) si al menos una de ellas actúa sobre la otra.

El **enlace** (bondage) de un conjunto $A \subseteq \mathcal{T}$ de cosas es el conjunto B_A de vínculos (o acoplamientos o conexiones) entre ellas. Así, el conjunto total de relaciones entre los componentes de una entidad compleja puede descomponerse en su enlace B_A y el conjunto $\bar{B}_A$ de relaciones no vinculantes.

Ahora podemos introducir la noción del **A-entorno** de una cosa x con A-composición $\mathcal{P}_A(x)$. Se definirá como el conjunto de todas las cosas, distintas de las de $\mathcal{P}_A(x)$, que actúan sobre estas últimas o son actuadas por ellas:

$$\mathcal{E}_A(x) = \{y \in \mathcal{T} \mid \neg(y \in \mathcal{P}_A(x)) \wedge (\exists z)(z \subset x \wedge (y \triangleright z \vee z \triangleright y))\}.$$

Finalmente, la **estructura** de una cosa se definirá como el conjunto de todas las relaciones entre los componentes de la cosa, así como entre estos y las cosas en el entorno de la cosa.

Ahora tenemos todo lo que necesitamos para definir la noción de un **sistema concreto**:

DEFINICIÓN 1.1 Un objeto es un **sistema concreto** si está compuesto por al menos dos cosas diferentes conectadas.

Figura 1: *
Fig. 1.2. Un sistema de dos componentes con tres posibles estructuras internas.

Ejemplo Una molécula, un arrecife de coral, una familia y una fábrica son sistemas. Por otro lado, un conjunto de estados de una cosa y una colección de eventos, incluso si están ordenados, no son sistemas concretos. Símbolo: Σ.

Y ahora las tres características de cualquier sistema:

DEFINICIÓN 1.2 Sea $\sigma' \in \Sigma$ un sistema concreto y $A \subset \mathcal{T}$ una clase de cosas. Entonces,

(i) la A-composición de σ' en un momento dado t es el conjunto de sus A-partes en t:

$$\mathcal{C}_A(\sigma', t) = \{x \in A \mid x \subset \sigma'\};$$

(ii) el A-entorno de σ' en el momento t es el conjunto de todas las cosas de clase A, que no son componentes de σ', que actúan o son actuadas por componentes de σ' en t:

$$\mathcal{E}_A(\sigma', t) = \{x \in A \mid x \notin \mathcal{C}_A(\sigma', t) \wedge (\exists y)(y \in \mathcal{C}_A(\sigma', t) \wedge (x \triangleright y \vee y \triangleright x))\};$$

(iii) la A-estructura (u organización) de σ' en el momento t es el conjunto de relaciones, en particular vínculos, entre los componentes de σ', y entre estos y las cosas en el entorno de σ', en t:

$$\mathcal{S}_A(\sigma', t) = \{R_i \in B_A(\sigma', t) \cup \bar{B}_A(\sigma', t) \mid |B_A(\sigma', t)| \neq \emptyset \wedge 1 \leq i \leq n\},$$

donde $B_A(\sigma', t)$ es el conjunto de relaciones de enlace (bonding relations), y $\bar{B}_A(\sigma', t)$ el de relaciones de no-enlace (non-bonding relations), definidas en $\mathcal{C}_A(\sigma', t) \cup \mathcal{E}_A(\sigma', t)$.

Ejemplo El sistema posible más simple está compuesto por dos cosas conectadas, a y b, en un entorno agrupado en una sola cosa c. Es decir, $\mathcal{C}(\sigma') = \{a, b\}$, $\mathcal{E}(\sigma') = \{c\}$. Este sistema puede tener cualquiera de las siguientes estructuras internas: $a \triangleright b$, $b \triangleright a$, o $a \rightleftharpoons b$ (véase la Figura 1.2). (Estas son las estructuras internas concebibles. Pero algunas de ellas podrían no ser nomológicamente posibles, y mucho menos técnicamente factibles o incluso deseables.) En cuanto a

CAPÍTULO 1

Figura 2: *
Fig. 1.2. Un sistema de dos componentes con tres posibles estructuras internas.

las estructuras externas, pueden ser cualquiera de estas o sus uniones: $\{a \triangleright c\}$, $\{b \triangleright c\}$, $\{c \triangleright a\}$, $\{c \triangleright b\}$.

Un conocimiento exhaustivo de un sistema comprendería los siguientes puntos: (a) la composición, el entorno y la estructura del sistema; (b) la historia del sistema (particularmente si es un biosistema o un sociosistema); y (c) las leyes del sistema. Un conocimiento tan completo rara vez es alcanzable, particularmente con referencia a sistemas complejos. Pero para poder hablar de sistemas en absoluto, deberíamos conocer al menos su composición, su entorno y su estructura. Por lo tanto, podemos decir que el modelo constituido por la terna ordenada

$$\sigma(\sigma, t) = \langle \mathcal{C}(\sigma, t), \mathcal{E}(\sigma, t), \mathcal{S}(\sigma, t) \rangle$$

es el **modelo mínimo** del sistema σ en el momento t. Obviamente, este modelo cualitativo no será suficiente para propósitos cuantitativos, como predecir la tasa de formación o descomposición de un sistema. Por lo tanto, complementaremos el modelo mínimo anterior con un modelo cuantitativo que se presentará en la Sección 2.2. Sin embargo, antes de hacerlo, utilizaremos el modelo mínimo para aclarar una serie de cuestiones que a menudo son oscuras en la literatura sobre sistemas.

1.3. Más de lo Mismo

Antes de continuar nuestro estudio de los sistemas y sus modelos, debemos asegurarnos de que el concepto de sistema concreto no esté ocioso, es decir, que algunas cosas sean sistemas mientras que otras no lo son. Que algunas cosas no son sistemas se deriva de la suposición de que existen cosas básicas o elementales, es decir, cosas sin partes (Vol. 3, Postulado 1.4). Y que otras cosas son sistemas se deriva de la hipótesis ontológica de que toda cosa —excepto el universo como un todo— actúa sobre, y es actuada por, otras cosas (Vol. 3, Postulado 5.10). En resumen, hemos demostrado el no trivial

TEOREMA 1.1 (i) Existen sistemas concretos. (ii) Toda cosa es un componente de al menos un sistema.

Ciertamente, la identificación y el modelado de un sistema concreto pueden ser una tarea extremadamente difícil. Así, no siempre está claro cuál es la composición,

SISTEMA

... y, por lo tanto, también el entorno, de un sistema, particularmente si está fuertemente acoplado a otros sistemas —como es el caso de los sistemas económico y político de una sociedad. Sin embargo, este es un problema científico, no ontológico.

Nótese que las **acciones** y las **conexiones** correspondientes han sido definidas para **cosas**, no para **propiedades**. Estas últimas pueden ser interdependientes, pero no interactuantes. Es decir, la frase común 'Las propiedades P y Q interactúan' debe entenderse como "Las propiedades P y Q (de una cosa dada) son **interdependientes**", o "Las cosas con propiedad P interactúan con las cosas con propiedad Q".

Las conexiones pueden ser permanentes o temporales, estáticas o dinámicas. En este último caso, a menudo se denominan **flujos** —de energía, como en la transferencia de calor; de materia, como en las migraciones; o de campos, como en una red de televisión. Si un flujo físico lleva información, la conexión se llama **informacional** y todo el sistema se denomina 'sistema de información'. Sin embargo, la distinción físico/informacional es de énfasis, no una dicotomía, ya que todo flujo de información se desplaza sobre algún flujo de energía. (Véase Apéndice A, Sec. 104.)

Nuestra definición del entorno de un sistema como el conjunto de todas las cosas acopladas con los componentes del sistema deja claro que se trata del **entorno inmediato**, no del entorno total, es decir, el conjunto de todas las cosas que no son parte del sistema. Excepto en la astronomía extragaláctica y en la cosmología, no estamos interesados en las transacciones de un sistema con el resto del universo, sino solo en aquella porción del mundo que ejerce una influencia significativa sobre la cosa de interés. Este **entorno inmediato** o **medio** es la célula en el caso de los cromosomas, el resto del organismo en el caso de un órgano, el ecosistema en el caso de un organismo, el sistema solar en el caso de una biosfera, y así sucesivamente. En otras palabras, el entorno inmediato de una cosa es la composición de su siguiente **supersistema**. (Más en la Sec. 104.)

Se dice que un sistema que ni actúa sobre, ni es actuado por, ninguna otra cosa es **cerrado**. En otras palabras, establecemos la

DEFINICIÓN 1.3 Sea σ' un sistema con entorno $\mathcal{E}(\sigma', t)$. Entonces σ' es **cerrado** en t si $\mathcal{E}(\sigma', t) = \emptyset$ — de lo contrario σ' es **abierto**.

Dado que toda cosa, excepto el universo, interactúa con alguna otra cosa, inferimos el

COROLARIO 1.1 El universo es el único sistema cerrado en todo momento.

CAPÍTULO 1

Esto se mantiene ya sea que el universo resulte ser espacialmente infinito o no, ya que el universo puede definirse como aquella cosa que tiene un **entorno vacío** (es decir, que es autocontenido).

Esto es en cuanto al concepto de cierre total. También necesitamos la noción de **cierre parcial**, o cierre relativo a una propiedad dada, ya que un sistema puede estar abierto en algunos aspectos y cerrado en otros. (Así, todos los sistemas están abiertos gravitacionalmente, pero algunos están cerrados eléctricamente, otros están cerrados al intercambio de materia, otros a las influencias culturales, y así sucesivamente.) Por lo tanto, establecemos la

DEFINICIÓN 1.4 Sea P una propiedad de un sistema σ en un entorno $\mathcal{E}(\sigma, t)$. Entonces σ es **abierto con respecto a** P en t si P está relacionado, en t, con al menos una propiedad de las cosas en $\mathcal{E}(\sigma, t)$ — de lo contrario σ es **cerrado** con respecto a P.

Comparando esta definición con la anterior, nos damos cuenta de que un sistema es cerrado si y solo si es cerrado en todos los aspectos.

Finalmente, algunos comentarios sobre el concepto de **estructura**. Nuestro uso de este concepto es común en matemáticas y en las ciencias sociales. Así, un famoso antropólogo afirma: para el bioquímico, un organismo .es un sistema complejamente integrado de moléculas complejas. El conjunto de relaciones mediante las cuales estas unidades están relacionadas es la **estructura orgánica**. Tal como se usan los términos aquí, el organismo no es en sí mismo una estructura; es una colección de unidades (células o moléculas) *dispuestas en una estructura*, es decir, en un conjunto de relaciones; el organismo **tiene una estructura**"(Ratcliffe-Brown, 1935). Los biólogos usan 'estructura' a veces en el sentido anterior y en otras ocasiones como sinónimo de 'componente anatómico'. En este último caso, corren el riesgo de hablar de la estructura de una estructura.

A veces es útil distinguir la **estructura interna** de un sistema de su **estructura externa**. La primera es el subconjunto de la estructura total formado por las relaciones (en particular, las conexiones) entre los componentes del sistema. Y la estructura externa es, por supuesto, el complemento de la estructura interna a la estructura total. Aunque distintas, la estructura interna y la externa son **interdependientes**. Así, la estructura interna de una molécula, lejos de ser una propiedad permanente e intrínseca de la molécula, depende críticamente de su estructura externa, es decir, de las interacciones entre la molécula y su medio (por ejemplo, el solvente).

Otra distinción que vale la pena hacer es la que existe entre la **estructura total** y la **estructura espacial**, o el conjunto de relaciones espaciales entre las partes de una cosa. (**La estructura o configuración espacial no debe confundirse con la forma**. La gran mayoría de los sistemas en el universo, es decir, los átomos de hidrógeno y helio, carecen de forma. Los sistemas sociales tampoco tienen forma, aunque

SISTEMA

... tienen una **configuración espacial**, ya que están compuestos por seres vivos que se encuentran en relaciones espaciales definidas entre sí.) Todo sistema tiene tanto una **estructura de sistema** (o vínculo) como una **estructura espacial** (o configuración). Por otro lado, los agregados o ensamblajes tienen estructuras espaciales pero carecen de estructuras de sistema.

Para facilitar la referencia, reunimos algunas de las anteriores aclaraciones en la

DEFINICIÓN 1.5 Sea σ'' un sistema concreto con A-estructura $\mathcal{S}_A(\sigma'', t)$ en el momento t. Entonces (i) la **estructura A-interna** de σ'' en t es el subconjunto de $\mathcal{S}_A(\sigma'', t)$ compuesto por las relaciones entre las A-partes de σ'' en t; (ii) la **configuración** (o **estructura espacial**) de σ'' en t es el subconjunto de $\mathcal{S}_A(\sigma'', t)$ compuesto por las relaciones espaciales entre las A-partes de σ'' en t.

1.4. Subsistema

Un componente de un sistema puede o no ser un sistema en sí mismo. Si lo es, lo llamamos **'subsistema'**. Más explícitamente, establecemos la

DEFINICIÓN 1.6 Sea σ'' un sistema con composición $\mathcal{C}(\sigma'', t)$, entorno $\mathcal{E}(\sigma'', t)$ y estructura $\mathcal{S}(\sigma'', t)$ en el momento t. Entonces una cosa x es un subsistema de σ'' en t, o $x \lhd \sigma''$, si y solo si (i) x es un sistema en el momento t, y (ii) $\mathcal{C}(x, t) \subseteq \mathcal{C}(\sigma'', t) \wedge \mathcal{E}(x, t) \supseteq \mathcal{E}(\sigma'', t) \wedge \mathcal{S}(x, t) \subseteq \mathcal{S}(\sigma'', t)$.

Por definición, la relación de subsistema ($\lhd$) es una **relación de orden**, es decir, es reflexiva, asimétrica y transitiva. Así, en particular, si $\sigma_1 \lhd \sigma_2$ y $\sigma_2 \lhd \sigma_3$, entonces $\sigma_1 \lhd \sigma_3$. Haremos uso de esta propiedad al definir la noción de un **sistema de sistemas anidados** (Definición 1.7).

Ejemplo 1 Las fábricas, los hospitales y las escuelas constituyen subsistemas de cualquier sociedad moderna. Por otro lado, las personas que los componen no son en sí mismas sistemas sociales: son biosistemas.

Ejemplo 2 Un feto es un subsistema de su madre; se convierte en un sistema por derecho propio después del nacimiento: antes de eso, no cae bajo ninguna de las leyes, naturales o sociales, que rigen para los sistemas independientes.

Los sistemas de diferente tipo tienen composiciones diferentes o estructuras diferentes. (Una diferencia en la composición induce una diferencia estructural, pero no al revés, como lo demuestra la existencia de isómeros, es decir, sistemas con la misma composición pero estructuras diferentes.) Sin embargo, todos los sistemas del mismo género parecen tener la misma **estructura general** o "plan general"—

CAPÍTULO I

... disculpe el antropomorfismo. Por ejemplo, todos los átomos consisten en núcleos rodeados de electrones, todos los sólidos son retículos atómicos o iónicos habitados por electrones errantes, e incluso la **estructura general** del esqueleto y los órganos es la misma para todos los vertebrados. (Sin embargo, la caracterización precisa de la noción de **estructura general** es un problema abierto.)

A menudo se dice que las estructuras vienen superpuestas o **anidadas** como sistemas de cajas chinas. Así, se dice que un polipéptido tiene dos estructuras, una **primaria** o básica (la secuencia lineal de aminoácidos), la otra **secundaria** y consistente en la configuración de la bobina completa. La configuración helicoidal de la molécula de ADN es un ejemplo de estructura secundaria. A su vez, la estructura secundaria puede determinar una **estructura terciaria**, por ejemplo, el plegamiento de toda la doble hebra en una configuración regular. Véase la Figura 1.3.

Desde nuestro punto de vista, no existe tal cosa como una **jerarquía de estructuras**. (Etimológicamente, 'jerarquía' significa un conjunto de componentes sagrados ordenados por una relación de poder o dominación.) Lo que sí tenemos aquí es un **sistema de sistemas anidados**, es decir, una colección de sistemas en la que cada uno es un subsistema de un sistema más grande (o supersistema). Y lo que los biólogos moleculares llaman 'estructura primaria' es la estructura del sistema más interno o **núcleo**, la estructura secundaria es la estructura del siguiente supersistema, y así sucesivamente. Esta noción es aclarada por la

DEFINICIÓN 1.7 Sea σ'' un sistema y llamemos $\mathcal{T}$ a la totalidad de los sistemas, y

$$\mathcal{M}_\sigma = \{\sigma_i \in \mathcal{T} \mid \sigma'' \lhd \sigma_i \wedge 1 \leq i \leq n\}$$

una colección de supersistemas de σ'' parcialmente ordenados por la relación de subsistema $\lhd$. Entonces (i) $\mathcal{M}_\sigma$ es un **sistema de sistemas anidados** con núcleo σ'';

Figura 3: *

Fig. 1.3. Un sistema imaginario de cajas chinas o jerarquía de sistemas. La estructura primaria, es decir, la secuencia de aminoácidos, no se muestra. La estructura secundaria es la hélice, la terciaria es la forma de Z. Y la estructura cuaternaria es la forma en que los individuos en forma de Z se ensamblan juntos, es decir, la doble escalera.

SISTEMA

(ii) la **estructura primaria** de σ es la estructura de σ misma; la **estructura secundaria** de σ es la estructura del supersistema más pequeño de σ en $\mathcal{M}_\sigma$, es decir, σ_1; en general, la **estructura** n**-aria** de σ es la estructura de σ_{n-1}.

1.5. Nivel

Se ha hablado con frecuencia de **niveles de organización** (o complejidad, integración o evolución) y de una jerarquía de estos en la ciencia, particularmente en biología, durante el último medio siglo. Desafortunadamente, no hay consenso sobre el significado de los términos '**nivel**' y '**jerarquía**', que se utilizan de diversas maneras y rara vez, o nunca, se definen (Bunge, 1959b, 1959c). Esta vaguedad debe atribuirse no solo a los científicos, sino también a los filósofos: a los filósofos inexactos que desprecian la claridad y a los exactos que no son conscientes de los problemas filosóficos planteados por la investigación científica.

Intentemos remediar esta situación aclarando un concepto de **nivel** y el concepto correspondiente de **jerarquía** que son ampliamente utilizados en la ciencia contemporánea.

La idea intuitiva es simple: las cosas en cualquier nivel dado están compuestas por cosas que pertenecen a los niveles precedentes. Así, las biosferas están compuestas por ecosistemas, que están compuestos por poblaciones, que están compuestas por organismos, que están compuestos por órganos, que están compuestos por células, que están compuestas por orgánulos, que están compuestos por moléculas, que están compuestas por átomos, que están compuestos por las llamadas partículas elementales. Una forma de precisar esta noción es mediante la

DEFINICIÓN 1.8 Sea $\mathcal{L} = \{L_i \mid 1 \leq i \leq n\}$ una familia de n conjuntos no vacíos de cosas concretas. Entonces (i) un nivel **precede** a otro si todas las cosas en este último están compuestas por cosas en (algunos o todos) de los primeros. Es decir, para cualquier L_i y L_j en $\mathcal{L}$,

$$L_i < L_j =_{df} (\forall x)[x \in L_j \Rightarrow (\exists y)(y \in L_i \wedge y \in \mathcal{P}(x))];$$

(ii) una cosa pertenece a un nivel dado si está compuesta por cosas en (algunos o todos) los niveles precedentes. Es decir, para cualquier $L_i \in \mathcal{L}$:

$$\forall x \text{ en } L_i : x \in L_i =_{df} \mathcal{P}(x) \subset \bigcup_{k=1}^{i-1} L_k;$$

(iii) $\mathfrak{L} = \langle \mathcal{L}, < \rangle$ es una **estructura de nivel**.

Nótese lo siguiente. Primero, un **nivel no es una cosa sino un conjunto** y, por lo tanto, un concepto, aunque no uno ocioso. Por ende, los niveles no pueden actuar unos sobre otros. En particular, los niveles superiores no pueden mandar ni siquiera obedecer a los

CAPÍTULO I

... inferiores. Toda mención de acción entre niveles es elíptica o metafórica, no **literal**. Segundo, la relación entre niveles no es ni la relación parte-todo ni la relación de inclusión de conjuntos, sino una relación **sui generis** definible en términos de las anteriores. Tercero, no hay nada oscuro en la noción de **precedencia de nivel** siempre que uno se adhiera a la definición anterior en lugar de interpretar '$L_i < L_j$' como "los L_i son inferiores a los L_j.º algo similar. Cuarto, es erróneo llamar **jerarquía** a una estructura de nivel $\mathfrak{L} = \langle \mathcal{L}, < \rangle$, porque el orden de nivel $<$ no es una relación de dominio (Bunge, 1973a). Quinto, nuestro concepto es hasta ahora estático: no estamos asumiendo nada sobre el origen o el modo de composición de los sistemas en términos de evolución.

1.6. Asociación de Sistemas

Ya sea que dos cosas formen o no un sistema, se puede asumir que se **asocian** (o se suman físicamente) para formar una tercera cosa. Así, la cosa a y la cosa b, sin importar cuán distantes e indiferentes sean, pueden asumirse que forman la cosa $c = a + b$. En otras palabras, el conjunto de cosas es cerrado bajo la operación $+$ de asociación, adición física o yuxtaposición (Vol. 3, Cap. 1, Sec. 1).

No ocurre lo mismo con los sistemas: dos sistemas pueden o no asociarse para formar un tercero. Así, dos moléculas pueden no combinarse para formar un sistema, y dos sistemas sociales pueden no fusionarse para formar un tercero. En general, la adición física o asociación de dos cosas será una cosa, pero no un sistema: la **sistemología no se conserva**. El entorno, la estructura y quizás incluso la composición de la cosa resultante son diferentes de la mera unión de las composiciones, entornos y estructuras parciales. Véase la Figura 1.4. En resumen, el conjunto de todos los sistemas no tiene **estructura algebraica** —ni siquiera la más modesta de un semigrupo. Pero, por supuesto, dado que los sistemas son cosas, cumplen con el **álgebra de cosas**. En particular, se asocian para formar otras cosas.

SISTEMA 15

1.7. Otros Tipos de Sistemas: De Propiedades y Funcionales

Estamos interesados no solo en sistemas concretos, sino también en **sistemas de propiedades**, o conjuntos de propiedades interrelacionadas, así como en **sistemas funcionales**, o conjuntos de procesos acoplados. Por ejemplo, la mayoría de las propiedades de una cosa, ya sea simple (básica) o un sistema, están ligadas entre sí; es decir, un cambio en una de ellas va acompañado de cambios en otras. Como consecuencia, la mayoría de los cambios que ocurren en una cosa simple o en un sistema están acoplados, de modo que si uno de ellos comienza o se detiene, otros cambian. (El prefijo cauteloso 'la mayoría' tiene la intención de excluir propiedades superficiales, como la posición y el color, que a menudo pueden cambiar considerablemente, dentro de ciertos límites, sin arrastrar cambios en otras propiedades.) Aunque toda cosa, aparte de un agregado o conglomerado, tiene propiedades y experimenta procesos que constituyen sistemas, los **sistemas de propiedades** y los **sistemas funcionales** son particularmente conspicuos entre los organismos. En particular, las capacidades mentales de un animal forman un sistema.

Utilizaremos las siguientes convenciones:

DEFINICIÓN 1.9 Sea $p(x)$ el conjunto de propiedades de una cosa x, y $n(x)$ el conjunto de procesos que ocurren en x. Entonces (i) el subconjunto $p_0(x) \subset p(x)$ es un **sistema de propiedades** de x si y solo si toda propiedad en $p_0(x)$ está relacionada legalmente con al menos otra propiedad en $p_0(x)$; (ii) el subconjunto $n_0(x) \subset n(x)$ es un **sistema funcional** de x si y solo si todo proceso en $n_0(x)$ está relacionado legalmente con al menos otro proceso en $n_0(x)$.

Debido a que en un sistema todas las propiedades y procesos están legalmente interrelacionados, concluimos que, para todo x, x es un sistema concreto si y solo si $p(x)$ es un sistema de propiedades o $n(x)$ es un sistema funcional.

1.8. Observaciones Finales

La literatura sobre sistemas es **vasta**, está creciendo rápidamente y es algo **desconcertante**. (Cf. Klir y Rogers, 1977.) Sin embargo, el campo aún es **inmaduro** y su reputación está en peligro por un sector de charlatanes. Baste mencionar tres indicadores de inmadurez.

En primer lugar, la definición misma del concepto de sistema aún está en duda, por lo que muchos artículos comienzan dedicando tiempo a definir o redefinir el concepto. Sin embargo, tanto esfuerzo dedicado a las definiciones solo ha producido tres que son tan populares como incorrectas. Según la primera definición,

CAPÍTULO 1

... definición, un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados —lo cual está bien para sistemas conceptuales, pero no para sistemas concretos, ya que los conjuntos, por muy estructurados que estén, son conjuntos, y por lo tanto, conceptos, no cosas. La segunda definición equipara un sistema con una **caja negra** equipada con entradas y salidas —lo cual es útil en algunos casos, pero inútil cuando la estructura interna del sistema es relevante. Y la tercera definición ampliamente utilizada es una generalización de la anterior: un sistema es una **relación binaria** —de nuevo, un objeto conceptual.

En segundo lugar, algunos autores afirman que todo lo imaginable es un sistema, y que una teoría general de sistemas debería tratar con toda cosa posible (sin que por ello se convierta en parte de la filosofía) y con todo problema posible, teórico o práctico, concerniente al comportamiento de sistemas de todo tipo. Algunos incluso han afirmado que tal teoría debería cubrir no solo los sistemas concretos sino también los conceptuales, de modo que sería una ciencia de todo completamente unificada.

En tercer lugar, algunos entusiastas de las teorías generales de sistemas han visto en ellas una **vindicación de las filosofías holísticas** y, por ende, una condena del método analítico característico de la ciencia. Sin embargo, la mayoría de los que aprueban las teorías generales de sistemas por sus supuestas virtudes holísticas o bien **usan incorrectamente** el término 'holístico' para designar "sistémico", o están interesados en la sabiduría instantánea en lugar de una minuciosa investigación científica o filosófica.

Tales confusiones y afirmaciones exageradas, que persisten debido a una insuficiente investigación fundamental en el campo de la sistemología, han provocado algunas reacciones completamente negativas hacia ella (por ejemplo, Berlinski, 1976). Si bien hay cierta legitimidad en tales reacciones, no se puede negar que la sistemología abunda en **buenas teorías** —como la teoría de autómatas y la dinámica lagrangiana general— que son útiles en varios campos, y que proporciona un marco inspirador para plantear problemas y construir modelos. En lugar de tirar el bebé con el agua del baño, deberíamos cambiar esta última de vez en cuando.

2. REPRESENTACIONES DE SISTEMAS

2.1. Gráficos y Matrices de Acoplamiento

A continuación, revisaremos dos formas estándar y equivalentes de representar un sistema con una composición **numerable**, ya sea una molécula o una planta industrial. Son la representación por **gráfico** y la representación por **matriz**. (Véase Klir y Valach (1967).) Los siguientes ejemplos muestran cómo proceder.

SISTEMA

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_4 = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

Las flechas indican **excitación**, las flechas cruzadas **inhibición**.

$$\sigma_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_7 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_8 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Los bucles indican **autotransferencia** o **retroalimentación** (feedback).

Generalizamos lo anterior en las siguientes asunciones semánticas. Sea σ un sistema con m componentes y n tipos diferentes de conexión entre ellos (p. ej., mecánica, química, informacional, social, etc.). Entonces σ es representable por:

(i) un conjunto de n **gráficos dirigidos** sobre la composición de σ, uno para cada tipo de conexión, con un total de m nodos (vértices), de tal manera que (a) los nodos representan los componentes y (b) las aristas representan las conexiones; o

(ii) un conjunto de n matrices $m \times m$, $\mathbf{M}_p$, donde $1 \leq p \leq n$, tal que (a) el elemento matricial $(\mathbf{M}_p)_{rs}$ de la p-ésima matriz representa la **intensidad de la acción** del componente r, en el p-ésimo aspecto, sobre el componente s, y (b) el elemento matricial $(\mathbf{M}_p)_{rr}$ representa la acción de tipo p del r-ésimo componente sobre **sí mismo** (**retroalimentación**).

Los elementos fuera de la diagonal $(\mathbf{M}_p)_{rs}$, con $r \neq s$, representan conexiones distintas a las autoconexiones. Hay $m^2 - m = m(m-1)$ de tales elementos por matriz, y un total de $nm(m-1)$ por sistema con n tipos diferentes de conexión. Este número se denomina **capacidad de acoplamiento** del sistema.

Hasta ahora hemos representado la composición y la **estructura interna** de un sistema, descuidando su entorno, y por lo tanto, su estructura externa. Un **sistema abierto**, es decir, uno conectado con su entorno, puede ser repre-

CAPÍTULO I

... sentarse de la siguiente manera. En lugar de construir una matriz $m \times m$ para un sistema de m componentes, como lo indica el postulado semántico anterior, formamos una matriz de $(m+1) \times (m+1)$ para cada tipo de conexión, permitiendo que **0** represente el entorno en bloque. Cualquier componente del sistema r para el cual $M_{0r} \neq 0$ es un componente de **entrada** o **receptor**, mientras que s es un componente de **salida** o **donante** del sistema si $M_{s0} \neq 0$. Por ejemplo, un sistema abierto de dos componentes con un único tipo de conexión se puede representar mediante la matriz:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}$$

Los elementos M_{01} y M_{02} son las **entradas** (al primer y segundo componente, respectivamente) y las entradas M_{10} y M_{20} las **salidas** (del primer y segundo componente, respectivamente). Las otras entradas representan las conexiones internas (o internunciales) entre los componentes del sistema.

Generalizamos lo anterior en la siguiente asunción semántica. Sea σ un sistema con m componentes y n tipos diferentes de conexiones entre ellos. Además, sea el entorno de σ interpretado como una única entidad etiquetada **0**. Entonces σ es representable por n matrices de $(m+1) \times (m+1)$, $\mathbf{M}_p$, donde $1 \leq p \leq n$, tal que (i) la **conectividad interna** de σ en el p-ésimo aspecto es representable por la matriz obtenida de $\mathbf{M}_p$ eliminando los elementos M_{r0} y M_{0s}; (ii) la **entrada** a σ en el aspecto p está representada por la fila de entradas de input de $\mathbf{M}_p$, es decir,

$$\mathbf{I}_p(\sigma) = \langle M_{p01}\ M_{p02}\ \cdots\ M_{p0m} \rangle;$$

(iii) la **salida** de σ en el aspecto p está representada por la columna de entradas de output de $\mathbf{M}_p$, es decir,

$$\mathbf{O}_p(\sigma) = \langle M_{p10}\ M_{p20}\ \cdots\ M_{pm0} \rangle^t,$$

donde t designa la operación de **transposición** (conversión de matriz fila en matriz columna); (iv) el **comportamiento** (o desempeño observable) de σ en el aspecto p es el par ordenado

$$\mathbf{B}_p(\sigma) = \langle \mathbf{I}_p(\sigma), \mathbf{O}_p(\sigma) \rangle;$$

(v) el **comportamiento (total)** de σ es el conjunto de sus comportamientos parciales:

SISTEMA

$$\mathbf{B}(\sigma) = \{\mathbf{B}_p(\sigma) \mid 1 \leq p \leq n\}.$$

Ejemplo En el caso más simple, de un sistema de dos componentes que interactúa con su entorno de una sola manera, tenemos

$$\mathbf{I}(\sigma) = \begin{Vmatrix} M_{01} & M_{02} \end{Vmatrix}, \quad \mathbf{O}(\sigma) = \begin{Vmatrix} M_{10} \\ M_{20} \end{Vmatrix}.$$

En ausencia de datos o hipótesis concernientes a la estructura interna (es decir, la matriz de acoplamiento completa) de tal sistema, debemos restringir nuestra atención a su **comportamiento**. Lo mejor que podemos hacer es suponer que este último es **lineal**, es decir, que existe una matriz $\mathbf{T}$ que transforma las entradas en salidas: $\mathbf{O} = \mathbf{TI}^t$, donde $\mathbf{I}^t$ es la transpuesta de $\mathbf{I}$. Entonces establecemos

$$\mathbf{T} = \begin{Vmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{Vmatrix}$$

con T_{ij} desconocidos y realizamos las operaciones indicadas:

$$\mathbf{TI}^t = \begin{Vmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} M_{01} \\ M_{02} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} T_{11}M_{01} + T_{12}M_{02} \\ T_{21}M_{01} + T_{22}M_{02} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} M_{10} \\ M_{20} \end{Vmatrix},$$

obteniendo así el sistema algebraico:

$$T_{11}M_{01} + T_{12}M_{02} = M_{10}$$
$$T_{21}M_{01} + T_{22}M_{22} = M_{20}.$$

Este sistema de ecuaciones no tiene una solución única cuando solo se da el comportamiento del sistema concreto (es decir, los M_{0i} y los M_{j0}), ya que en este caso solo hay dos condiciones (ecuaciones) para cuatro incógnitas (los T_{ij}). Incluso encontrar una solución por prueba y error no nos hará avanzar un solo paso en el proceso de encontrar la **estructura** del sistema, es decir, la matriz de acoplamiento completa $\mathbf{M}$. El único procedimiento que podría tener éxito es suponer y probar hipótesis alternativas sobre la estructura del sistema y verificar si estas producen el comportamiento observado (o conjeturado). Es decir, el camino hacia el **conocimiento teórico** no es del comportamiento a la estructura inferida, sino de la **estructura hipotetizada al comportamiento**. Esto demuestra que el conductismo, el fenomenalismo y el inductivismo son incapaces, y no solo reacios, a explicar el comportamiento.

Obviamente, ni la representación por gráfico ni la representación por matriz de un sistema son suficientes para todos los propósitos. Solo representan la composición, la estructura y el entorno de un sistema, con descuido de su **dinámica**. Una representación más completa solo puede obtenerse estableciendo un completo

CAPÍTULO I

... teoría **dinámica** que incorpore y expanda la información contenida en la representación de gráfico o de matriz. A continuación, pasamos al núcleo común de tales representaciones dinámicas, a saber, la **representación del espacio de estados**. (Véanse los Apéndices para una serie de modelos matemáticos de sistemas particulares, aunque también interdisciplinarios.)

2.2. La Representación del Espacio de Estados

Todo sistema de un tipo dado K tiene un número finito n de **propiedades generales**, como la edad, el número de componentes, la conectividad entre ellos, las entradas y las salidas. Y cada propiedad general es representable por una función $F_i : A \to V_i$, donde $1 \leq i \leq n$. Recopilando todas estas funciones que representan propiedades en una única n-tupla ordenada o lista

$$\mathbf{F} = \langle F_1, F_2, \ldots, F_n \rangle : A \longrightarrow V_1 \times V_2 \times \cdots \times V_n$$

formamos la **función de estado** de los sistemas del tipo dado. Así como $\mathbf{F}$ representa la totalidad de las propiedades generales de los sistemas de tipo K, cada valor $\mathbf{F}(\sigma) = \langle F_1(\sigma), F_2(\sigma), \ldots, F_n(\sigma) \rangle$ representa la totalidad de las **propiedades individuales** de un sistema particular, como su edad y composición en un momento dado.

El dominio A de la función de estado $\mathbf{F}$ de los sistemas de tipo K es el producto cartesiano de ciertos conjuntos, como K, la familia $\mathcal{P}(\mathcal{E})$ de conjuntos de elementos ambientales con los que los miembros de K están acoplados, el conjunto $\mathcal{F}$ de marcos de referencia, el conjunto $\mathcal{T}$ de instantes de tiempo, y así sucesivamente. ($\mathcal{P}(\mathcal{E})$ es el conjunto potencia del conjunto $\mathcal{E}$ de cosas ambientales, por lo que el entorno e de un sistema particular es un miembro de esa familia, es decir, $e \in \mathcal{P}(\mathcal{E})$.) Y el codominio V_i del i-ésimo componente F_i de la función de estado se toma usualmente como algún subconjunto de la línea real $\mathbb{R}$. (Si una propiedad es representada por una función de valor complejo, cada componente de esta última cuenta como un componente de $\mathbf{F}$.) En resumen,

$$\mathbf{F} : K \times \mathcal{P}(\mathcal{E}) \times \mathcal{F} \times \mathcal{T} \times \cdots \longrightarrow \mathbb{R}^n.$$

El valor $\mathbf{F}(k, e, f, t, \ldots) = \langle a, b, \ldots, n \rangle \in \mathbb{R}^n$ de la función de estado del sistema $k \in K$ que interactúa con elementos ambientales $e \in \mathcal{P}(\mathcal{E})$, relativo al marco de referencia $f \in \mathcal{F}$ en el instante $t \in \mathcal{T}$, es el **estado** de k en t. La colección de todos estos posibles estados, que es un subconjunto de $\mathbb{R}^n$, es el **espacio de estados** (concebible) de los sistemas de tipo K, o $\mathcal{S}(K)$ para abreviar. Sin embargo, dado que los componentes de $\mathbf{F}$ están legalmente interrelacionados y, por lo tanto, mutuamente restringidos, no toda n-tupla de números reales representa un estado realmente (o nomológicamente) posible de un sistema. Es decir, el **espacio de estados legal** de los sistemas de tipo K, o $\mathcal{S}_L(K)$ para abreviar, es un subconjunto propio del espacio de estados concebible $\mathcal{S}(K)$.

SISTEMA

En resumen, todo estado realmente posible de un sistema K es un punto en alguna región $\mathcal{S}_L(K)$ del espacio cartesiano $\mathbb{R}^n$. Véase la Figura 1.5.

Ejemplo 1 En la teoría cinética elemental de gases, la **función de estado** es la terna compuesta por las funciones de presión, volumen y temperatura. El **espacio de estados** correspondiente es un cubo contenido en $(\mathbb{R}^+)^3$.

Ejemplo 2 En la dinámica hamiltoniana, el **vector de estado** (o fase) es $\langle q(k, f, t), p(k, f, t)\rangle$, donde q es la coordenada canónica y p el momento correspondiente, ninguno de los cuales necesita ser una propiedad mecánica.

Ejemplo 3 En la cinética química, el estado instantáneo de un sistema químico se describe por los valores de las concentraciones parciales de los reactivos y los productos de reacción. Por lo tanto, el espacio de estados del sistema es un **hipercubo** contenido en $(\mathbb{R}^+)^n$, donde n es el número de componentes del sistema (reactivos, catalizadores y productos). Si hay difusión, se deben añadir ejes adicionales al espacio de estados, en particular las coordenadas de temperatura y posición.

Ejemplo 4 En la genética de poblaciones, tres variables de estado comúnmente utilizadas son el tamaño de una población, la probabilidad (incorrectamente llamada "frecuencia") de algún gen o constelación de genes en particular, y el valor adaptativo de esta última. Por lo tanto, para un sistema compuesto por dos poblaciones que interactúan, A y B, el espacio de estados es la región de $\mathbb{R}^6$ abarcada por los séxtuplos $\langle N_A(t), N_B(t), P_A(t), P_B(t), V_A(t), V_B(t)\rangle$ en el transcurso del tiempo.

El concepto de espacio de estados puede utilizarse para aclarar el de sistema. El espacio de estados de un **agregado** o conglomerado de cosas que no interactúan está determinado de forma única por los espacios de estados parciales. Además, dado que el

Figura 4: *
Fig. 1.5. El **espacio de estados legal** $\mathcal{S}_L(K)$ de los sistemas de tipo K es un subconjunto del producto cartesiano de los rangos de los componentes de la función de estado. Solo dos de esos componentes, F_i y F_j, están representados aquí. $F(\sigma) = \langle F_i(\sigma), F_j(\sigma)\rangle$ es un estado (realmente) posible de un sistema particular del tipo dado. A medida que el tiempo 'pasa', la punta de $F(\sigma)$ se mueve dentro de $\mathcal{S}_L(K)$.

CAPÍTULO I

... contribuciones de esta última están todas en pie de igualdad, podemos considerar que el espacio de estados total es igual a la unión de los espacios de estados parciales. En particular, sean $\mathcal{S}_L(K)$ y $\mathcal{S}_L(M)$ los espacios de estados legales de las cosas de tipos K y M, respectivamente. Entonces, el espacio de estados de la asociación $k + m$ de dos cosas que no interactúan de tipos K y M respectivamente, relativo al mismo marco de referencia, es $\mathcal{S}_L(K) \cup \mathcal{S}_L(M)$. No ocurre lo mismo en el caso de un **sistema**: aquí el estado de cada componente está determinado, al menos en parte, por los estados en los que se encuentran otros componentes del sistema, de modo que el espacio de estados total ya no es la unión de los espacios de estados parciales. Así, en el Ejemplo 4 anterior, el espacio de estados del sistema de dos componentes debe construirse **ab initio** en lugar de basarse únicamente en los espacios de estados para las biopoblaciones individuales. En resumen, una cosa es un **agregado** si y solo si su espacio de estados es igual a la unión de los espacios de estados de sus componentes; de lo contrario, es un **sistema (concreto)**. (Cf. Bunge, 1977a, 1977b.)

Todo **evento** ocurre en o a alguna cosa concreta y consiste en un **cambio de estado** de la cosa: el cambio puede ser meramente cuantitativo, como en el caso del movimiento, o también cualitativo, como en el caso del surgimiento o la metamorfosis de una cosa. Un destello de luz, la disociación de una molécula, una tormenta, el crecimiento de un brote, el aprendizaje de un truco y la caída de un gobierno son **eventos** —o más bien **procesos**, ya que son complejos y, por lo tanto, analizables en eventos posteriores. Al ser cambios en los estados de las cosas, los eventos y procesos son representables como **trayectorias** en los espacios de estados de las cosas cambiantes. (Una cosa inmutable, si existiera, tendría un espacio de estados que consistiría en un único punto.) Diferentes trayectorias en un espacio de estados pueden tener los mismos puntos finales. Es decir, hay casos en los que una y la misma **transición neta** puede efectuarse a lo largo de rutas alternativas. Véase la Figura 1.6.

No se supone que las funciones g y g' que aparecen en la Figura 1.6 sean arbitrarias: deben ser **legales** si queremos permitir solo eventos legales y descartar los ilegales, es decir, milagros. En otras palabras, la función g que aparece en la representación del evento $e = \langle s, s', g \rangle$ debe ser **compatible con las leyes** del sistema o sistemas en cuestión. Equivalentemente: un evento o proceso legal que ocurre en un sistema de tipo K, con puntos finales s y s', es representable por una terna $\langle s, s', g \rangle$, donde $g : \mathcal{S}_L(K) \to \mathcal{S}_L(K)$ es compatible con las leyes de los sistemas K. Si se ignoran los estados intermedios entre los puntos finales de los procesos, nos quedan flechas o pares ordenados $\langle s, s' \rangle \in \mathcal{S}_L(K) \times \mathcal{S}_L(K)$. La colección de todos estos pares de estados, es decir, el conjunto de todos los **eventos netos** (para un g dado), constituye el **espacio de eventos** de los sistemas K (para g). Símbolo:

SISTEMA

Figura 5: *
Fig. 1.6. Dos procesos diferentes que resultan en el mismo cambio neto. El cambio neto del estado s al estado s' puede representarse como el par ordenado (o flecha) $\langle s, s'\rangle$. Dado que el cambio a lo largo de la curva g puede ser distinto del cambio a lo largo de la curva g', $g \neq g'$, debemos representar los eventos (o procesos) completos mediante $\langle s, s', g\rangle$ y $\langle s, s', g'\rangle$, respectivamente.

$$\mathcal{E}(K) \subseteq \mathcal{S}_L(K) \times \mathcal{S}_L(K).$$

En general, la inclusión es propia: no todas las transiciones de estado son **legales**.

Dado que haremos un amplio uso de la **representación del espacio de estados** en este trabajo, bien podemos comprimir lo anterior en la siguiente asunción semántica. Para cada tipo K de sistema que posee n propiedades, existe una función que representa propiedades $\mathbf{F} : A \longrightarrow V_1 \times V_2 \times \cdots \times V_n$ con n componentes, denominada **función de estado** para sistemas de ese tipo. Además,

(i) la **totalidad de las propiedades generales** de los sistemas de tipo K es representable por el conjunto de todos los componentes (o coordenadas) de $\mathbf{F}$, es decir, $p(K) = \{F_i \mid 1 \leq i \leq n\}$;

(ii) cada **propiedad particular** de un sistema de tipo K es representable por un valor de un componente de $\mathbf{F}$, es decir, por $F_i(\sigma)$ para $\sigma \in A$ y algún $1 \leq i \leq n$;

(iii) el **estado** de los sistemas de tipo K en $\sigma \in A$ es representable por el valor de $\mathbf{F}$ en σ, es decir, $s = \mathbf{F}(\sigma) := \langle F_1(\sigma), F_2(\sigma), \ldots, F_n(\sigma)\rangle$;

(iv) la colección de todos esos estados de cosas de tipo K, es decir, el rango de $\mathbf{F}$, es el **espacio de estados legal** de los sistemas K, o $\mathcal{S}_L(K)$ para abreviar;

(v) todo **evento** que ocurre en un sistema de tipo K es representable por una terna ordenada $\langle s, s', g\rangle$, donde $s, s' \in \mathcal{S}_L(K)$ y g es un mapeo legal de $\mathcal{S}_L(K)$ en sí mismo;

(vi) la colección de todos los eventos (legales) realmente posibles que ocurren en sistemas de tipo K es el **espacio de eventos** de K, o $\mathcal{E}_L(K)$ para abreviar;

(vii) para un sistema en un entorno dado, y relativo a un-

CAPÍTULO I

... marco de referencia dado, la función de estado a menudo toma la forma de una función dependiente del tiempo $\mathbf{F} : \mathcal{T} \to \mathbb{R}^n$, donde $\mathcal{T} \subseteq \mathbb{R}$ es el conjunto de instantes relativos al marco dado;

(viii) Si $\mathbf{F} : \mathcal{T} \to \mathbb{R}^n$, entonces la totalidad de los procesos que ocurren en un sistema x de tipo K durante el intervalo de tiempo $\tau \subseteq \mathcal{T}$ es representable por el conjunto de estados en los que se encuentra x durante τ:

$$\mathbf{n}(x, \tau) = \{\mathbf{F}(t) \mid t \in \tau\};$$

(ix) la **historia** de un sistema x de tipo K, representable por una función de estado $\mathbf{F} : \mathcal{T} \to \mathbb{R}^n$, durante el intervalo $\tau \subseteq \mathcal{T}$, es representable por la trayectoria

$$h(x) = \{(t, \mathbf{F}(t)) \mid t \in \tau\};$$

(x) la **acción total** (o efecto) de una cosa x sobre una cosa y es igual a la diferencia entre la trayectoria forzada y la trayectoria libre del paciente y:

$$\mathcal{A}(x, y) = h(y \mid x) \setminus h(y).$$

Un tratamiento detallado de estos conceptos se da en otra parte (Vol. 3, Cap. 5). A continuación, los utilizaremos para avanzar un puñado de principios generales concernientes a los sistemas.

3. ASUNCIONES BÁSICAS

3.1. Cuestiones Estructurales

Hasta ahora solo hemos hecho algunas definiciones y asunciones semánticas, pero ninguna hipótesis sustantiva sobre la naturaleza de los sistemas. (El Teorema 1.1 sobre la existencia de sistemas y la no existencia de cosas extraviadas, así como el Corolario 1.1 sobre la apertura de los sistemas, se derivaron de nuestra definición de un sistema concreto junto con ciertos postulados generales sobre la naturaleza de las cosas, establecidos en el Volumen 3.) A continuación, apostaremos por un puñado de **asunciones básicas** concernientes a los sistemas de todo tipo, siendo las primeras ciertos postulados de índole estructural. Dado que estas asunciones se referirán a las transacciones de un sistema con su entorno, bien podemos definir los conceptos de **entrada** (*input*) y de **salida** (*output*) en términos más generales de lo que hicimos en la Sec. 2.1. Comenzamos entonces con la

DEFINICIÓN 1.10 Sea σ un sistema con un entorno (inmediato) $\mathcal{E}(\sigma)$. Entonces

SISTEMA

(i) la **totalidad de entradas** (*inputs*) de σ es el conjunto de todas las acciones ambientales sobre σ:

$$\mathbf{U}(\sigma) = \bigcup_{x \in \mathcal{E}(\sigma)} \mathcal{A}(x, \sigma);$$

(ii) la **totalidad de salidas** (*outputs*) de σ es el conjunto de todas las acciones del sistema sobre su entorno:

$$\mathbf{V}(\sigma) = \bigcup_{y \in \mathcal{E}(\sigma)} \mathcal{A}(\sigma, y);$$

(iii) la **actividad del entorno** de σ es

$$\mathcal{E}_{\mathcal{A}}(\sigma) = \bigcup_{x,y \in \mathcal{E}(\sigma)} \mathcal{A}(x, y) \cup \mathbf{U}(\sigma) \cup \mathbf{V}(\sigma).$$

Nuestra primera hipótesis es que todos los sistemas reciben entradas y son **selectivos**, es decir, aceptan solo un subconjunto (pequeño) de la totalidad de las acciones ambientales que inciden sobre ellos. Más precisamente, postulamos:

POSTULADO 1.1 Sea $\mathbf{U}(\sigma)$ la entrada total de un sistema σ. Entonces (i) $\mathbf{U}(\sigma) \neq \emptyset$; (ii) $\mathbf{U}(\sigma) \subset \mathcal{E}_{\mathcal{A}}(\sigma)$ o, equivalentemente, la **función de (selección de entrada)**

$$i : \mathbf{U}(\sigma) \longrightarrow \mathcal{E}_{\mathcal{A}}(\sigma)$$

es el mapa de inclusión (o incrustación) de $\mathbf{U}(\sigma)$ en $\mathcal{E}_{\mathcal{A}}(\sigma)$.

Ejemplo Hablar con las plantas es ineficaz, excepto en la medida en que las nutre con agua y dióxido de carbono.

Una segunda característica, igualmente omnipresente, de los sistemas concretos es que **reaccionan** sobre su entorno, es decir, que su salida nunca es nula. (Las llamadas **máquinas sin salida**, estudiadas en la teoría de autómatas, son, por supuesto, ficciones.) Además, en todo sistema existe actividad **espontánea**, es decir, no provocada por ninguna entrada. Así, postulamos:

POSTULADO 1.2 Sea $\mathbf{V}(\sigma)$ la salida total de un sistema σ. Entonces (i) $\mathbf{V}(\sigma) \neq \emptyset$; (ii) la **función de (selección de salida)**

$$o : \mathbf{V}(\sigma) \longrightarrow \mathcal{E}_{\mathcal{A}}(\sigma)$$

asigna a cada salida del sistema una acción ambiental, pero no a la inversa.

CAPÍTULO I

Ejemplo En toda neurona existe actividad **espontánea** que se superpone a la actividad provocada por la estimulación aferente.

Las hipótesis anteriores son principios metafísicos típicos en la medida en que pueden ser confirmados pero no refutados, pues dependen de un elemento que solo es parcialmente cognoscible, a saber, el conjunto $\mathcal{E}_{\mathcal{A}}$ de acciones ambientales. Cualquier evidencia desfavorable a nuestros postulados puede ser atribuida a nuestra ignorancia de la mayor parte de $\mathcal{E}_{\mathcal{A}}$.

La función de selección de entrada i y la función de selección de salida o se unen en la

DEFINICIÓN 1.11 La función f que se compone con la función de selección de salida o de un sistema para producir su función de selección de entrada i, es decir, tal que $i = f \circ o$, se llama **función de transferencia** (o **transductora**) $f : \mathbf{U}(\sigma) \longrightarrow \mathbf{V}(\sigma)$ de σ:

$$i = f \circ o.$$

Ejemplo La retina transforma (o mapea o codifica) los estímulos luminosos en señales nerviosas.

Cerramos esta subsección con un conjunto de principios generales que se enunciarán de manera informal:

POSTULADO 1.3 Sea σ un sistema arbitrario distinto del universo. Entonces (i) toda entrada a σ es una salida de algún otro sistema (es decir, no hay entradas que vengan de la nada); (ii) σ recibe entradas de **varios tipos** (es decir, en algún momento u otro, cada uno de los componentes de la función de estado de σ está obligado a ser afectado por cambios ambientales); (iii) para cada acción sobre σ, existe un **umbral** por debajo del cual σ no responde; (iv) la entrada total de σ tiene un componente **aleatorio** no nulo; (v) existe un **retraso**, por pequeño que sea, entre cada entrada y la salida correspondiente, si la hay.

Hasta aquí nuestras asunciones estructurales generales. Echemos ahora un vistazo a los sistemas desde una perspectiva evolutiva.

SISTEMA

3.2. Ensamblaje y Emergencia

Todo proceso mediante el cual un sistema se forma a partir de sus componentes se llama '**ensamblaje**'; si el proceso es espontáneo, se llama '**autoensamblaje**'. Un proceso de ensamblaje puede ocurrir en un solo paso o, más probablemente, en varios pasos: véase la Figura 1.7. Podemos expresar la idea formalmente con la ayuda del concepto de **vínculo** (*bondage*), o conjunto de enlaces entre los componentes de un sistema, introducido en la Sec. 1.2. De hecho, establecemos la **DEFINICIÓN 1.12** Sea x una cosa concreta compuesta inicialmente de partes desacopladas (posiblemente sistemas en sí mismas), es decir, tal que $|\mathbf{B}(x,t)| = 0$. Entonces (i) x se ensambla en y en el momento $t' > t$ si y solo si y es un sistema con la misma composición que x pero con un conjunto de vínculos no vacío, es decir,

$$\mathcal{P}(y,t') = \mathcal{P}(x,t) \wedge |\mathbf{B}(y,t')| \neq 0;$$

(ii) el proceso de ensamblaje es de **autoensamblaje** si y solo si el agregado x se convierte por sí mismo [es decir, de forma natural en lugar de artificial] en el sistema y;
(iii) el proceso de autoensamblaje es de **autoorganización** si y solo si el sistema resultante está compuesto por subsistemas que no existían antes del inicio del proceso.

Los procesos de ensamblaje pueden ser naturales o artificiales, y los de este último tipo, a su vez, experimentales (o de laboratorio) o industriales. Los procesos de ensamblaje artificial son, por supuesto, **guiados por el hombre**. Sin embargo, hay grados de control. Una cosa es ensamblar una máquina a partir de sus partes y otra ensamblar una molécula a partir de sus precursores. En la mayoría de los casos, el último proceso

Figura 6: *
Fig. 1.7. Ensamblaje de un sistema a partir de unidades previamente desconectadas, ya sea directamente o por etapas.

CAPÍTULO I

... procede por sí mismo —es decir, en virtud de su **dinámica interna**— una vez que se han suministrado los reactivos y las condiciones físicas adecuadas. Por ejemplo, las proteínas e incluso las unidades ribosómicas se autoensamblan *in vitro* en cuestión de minutos si se proporcionan los precursores y las condiciones físicas adecuadas. En este caso, el hombre solo echa una mano a la naturaleza, al reproducir condiciones que han ocurrido o podrían haber ocurrido espontáneamente.

Todas las síntesis químicas y bioquímicas son, por supuesto, **procesos de ensamblaje** y, además, procesos acompañados por la **emergencia de nuevas propiedades**.

Sin embargo, el autoensamblaje ocurre en todos los niveles y de diversas maneras. Quizás el proceso de autoensamblaje más visible de todos es la **agregación** o **aglomeración** de átomos y polvo cósmico provocada por la gravitación. Se cree que así se formaron los planetas y otros cuerpos celestes. Además, lejos de conducir siempre a masas desorganizadas, la atracción gravitacional puede dar lugar a agrupaciones complejas en todas las escalas astronómicas, en particular cúmulos de estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias. (Véase, por ejemplo, de Vaucouleurs, (1970).) Ejemplos similares de autoensamblaje por **condensación** de unidades del mismo tipo son la formación de complejos moleculares (como la polimolécula de hemocianina), de polímeros como los polipéptidos y de cristales a partir de soluciones. (Véase Calvin (1969); Eigen (1971); Lehninger (1975).) No hace falta decir que el autoensamblaje, y en particular la **autoorganización**, también ocurre a nivel social: testimonio de la formación de familias, bandas, comunidades y organizaciones sociales de diversos tipos. En resumen, el autoensamblaje y la autoorganización no son exclusivos de la vida. Lo **peculiar** de la autoorganización biótica es que resulta en **sistemas vivos** en lugar de sistemas bioquímicos o sistemas de otro tipo. (En otras palabras, es un **mecanismo de emergencia** que conduce a un nuevo nivel de organización.) Asumiremos que todos los sistemas, salvo el mundo entero, se han formado por ensamblaje:

POSTULADO 1.4 Todos los sistemas, excepto el universo, se originan por ensamblaje.

Observación 1 Los sistemas naturales se originan por **autoensamblaje**, y los sistemas artificiales, por ensamblaje **artificial** o **hecho por el hombre**.

Observación 2 Se hace una excepción para el universo porque (a) en las cosmologías naturalistas el universo no tiene origen ni fin, y (b) en las cosmologías religiosas no tiene sentido decir que el universo se origina por ensamblaje, ya que esto presupone la existencia previa de sus componentes.

Observación 3 Ciertamente, un sistema puede formarse por la descomposición de algún supersistema. Sin embargo, esto no es un contraejemplo a nuestro postulado, que solo requiere que el sistema original

SISTEMA

... supersistema fue el resultado de algún proceso de ensamblaje.

Observación 4 Nuestro axioma está lejos de ser obvio y no podría haberse formulado antes de que el **pensamiento sistémico** se volviera generalizado, aunque solo sea porque el concepto general de un sistema no había sido dilucidado hasta hace poco.

Observación 5 Nuestro axioma es de particular relevancia para el problema del **origen de las biomoléculas y los biosistemas**. Hasta hace poco, se asumía que ambos habían sido creados por decreto divino o que habían existido desde toda la eternidad. El *Origen de las Especies* de Darwin apareció recién en 1859, y la investigación científica sobre la evolución de las moléculas comenzó solo un siglo después.

Los componentes de un sistema autoensamblado se llaman sus **precursores**, un nombre apto que sugiere que el sistema no siempre existió, sino que **emergió** de cosas preexistentes. Curiosamente, (a) los precursores de un sistema no se mezclan, sino que mantienen su individualidad hasta cierto punto, y sin embargo, (b) dan lugar a una cosa que posee **propiedades emergentes**. Por ejemplo, los dos átomos de hidrógeno que se combinan en una molécula de hidrógeno son componentes distintos de esta última, pero el **espectro** de la molécula es radicalmente diferente al de sus componentes. La primera característica se formaliza diciendo que la composición del sistema autoensamblado es igual al conjunto de las partes de sus ancestros, es decir, el conjunto de sus precursores. Y la noción de **emergencia** puede dilucidarse de la siguiente manera.

Llamemos x a una cosa y $t \in \mathcal{T}$ a un instante de tiempo, e introduzcamos una función P que asigna a la pareja ordenada $\langle x, t\rangle$ el conjunto $P(x,t)$ de todas las propiedades de x en t. Es decir, P es una función $P : \mathcal{T} \times \mathcal{T} \to \mathcal{P}(\mathcal{P})$, donde $\mathcal{T}$ es el conjunto de todas las cosas, $\mathcal{T}$ el conjunto de todos los instantes, y $\mathcal{P}(\mathcal{P})$ la familia de subconjuntos del conjunto $\mathcal{P}$ de todas las propiedades generales de las cosas. Un cambio en la cosa x puede verse como un cierto cambio de estado de x. Dado que x se mantiene fijo a lo largo de ese cambio de estado, podemos usar la función más simple

$$P_x : \mathcal{T} \longrightarrow \mathcal{P}(\mathcal{P}) \text{ tal que } P_x(t) = P(x,t).$$

En resumen, $P_x(t)$ es la colección de propiedades de la cosa x en el momento t. (Para más detalles sobre P_x, véase Vol. 3, Cap. 2.)

Ahora sean t y t' dos instantes distintos, tales que t precede a t'. Los valores correspondientes de P_x son, por supuesto, $P_x(t)$ y $P_x(t')$. Si estos dos conjuntos de propiedades de x son el mismo, entonces la cosa no ha cambiado **cualitativamente**. Si son diferentes, la cosa ha ganado o perdido algunas propiedades. Si ocurre esto último, se dirá que las propiedades recién adquiridas son **emergentes** en relación con la cosa dada, aunque también puedan ser poseídas por otras cosas. En resumen, establecemos la

CAPÍTULO I

DEFINICIÓN 1.13 Sea x una cosa con propiedades $P(t)$ en el momento t, y propiedades $P(t')$ en un momento posterior $t' > t$. Entonces (i) la **novedad cualitativa total** que ocurre en x durante el intervalo $[t, t']$ es la diferencia simétrica

$$N(t, t') = P(t) \Delta \bigcup_{\tau \leq t'} P_x(\tau);$$

(ii) las **propiedades emergentes** que aparecen en x durante el intervalo $[t, t']$ son aquellas en

$$\mathcal{E}(t, t') = P(t') \setminus P(t).$$

Ejemplo 1 Toda reacción nuclear y toda reacción química resultan en la **emergencia de cosas** dotadas de **propiedades emergentes**.

Ejemplo 2 La descomposición (desmantelamiento) de un sistema y la sustitución de algunos de sus componentes son procesos de emergencia.

Nos atrevemos y generalizamos:

POSTULADO 1.5 Todo proceso de ensamblaje está acompañado por la emergencia de algunas propiedades y la pérdida de otras. Es decir, sea que las partes de una cosa x se autoensamblan en un sistema durante el intervalo $[t, t']$. Entonces el sistema carece de algunas de las propiedades de sus precursores —es decir, $P(t) \setminus P(t') \neq \emptyset$— pero, por otro lado, posee algunas propiedades nuevas —es decir, $P(t') \setminus P(t) \neq \emptyset$.

Hasta ahora nos hemos ocupado de la **novedad cualitativa** en una cosa particular, sin importar si las propiedades emergentes dadas son poseídas por otras cosas. Ahora dilucidamos el concepto de **emergencia por primera vez**, o **emergencia absoluta**:

DEFINICIÓN 1.14 Las **propiedades absolutamente emergentes** (o primicias) que aparecen en una cosa x durante el lapso $[t, t']$ son aquellas en

$$\mathcal{E}_a(t, t') = \mathcal{E}(t, t') \setminus \bigcup_{y \in \mathcal{T} \setminus \{x\}} \bigcup_{\tau \leq t'} P(y, \tau),$$

donde $y \neq x$ y $\tau \leq t'$.

3.3. Selección

Se están formando nuevos sistemas constantemente, pero no todos son **viables** en el entorno en el que emergen. De hecho, muchos son inadecuados y, por lo tanto, **efímeros**, ya sea porque son **internamente inestables** o porque **no pueden hacer frente a la agresión ambiental**. En este último caso, tenemos