

La evolución de la complejidad

ANTONIO GARCÍA-OLIVARES

LITEC

Consejo Superior de Investigaciones Científicas

1. INTRODUCCIÓN

La mecánica clásica ha sido desde 1685 el prototipo («paradigma») de lo que era y debería ser una teoría científica. Aún hoy los franceses usan el término «mecánica racional» para ella.

En oposición a ciertos fenómenos macroscópicos, como arrojar unos dados, que decimos que es un proceso aleatorio, una de las características de la mecánica es su estricto determinismo. Dadas las leyes de Newton del movimiento, basta con aumentar hasta el grado deseado la precisión de las condiciones iniciales para poder predecir la evolución futura (y pasada) de cualquier sistema de partículas.

Otra de las características de las leyes de la mecánica clásica es su invariancia frente a la inversión temporal: El cambio t por $-t$ no cambia la forma de la ecuación $m d(dx/dt)/dt = F$.

La ley es atemporal.

El *hamiltoniano* del sistema, un operador que garantiza la conservación de la energía, junto con la posición inicial del sistema en el espacio de fases, determina completamente la evolución futura y pasada. El espacio de fases es el espacio N -dimensional formado por todos los posibles valores de las N variables con las que estamos describiendo al sistema.

Todo flujo en el espacio de fases es incompresible si el sistema conserva la energía, y se va comprimiendo hacia estados cada vez menos numerosos del espacio de fases si el sistema, *disipativo*, disipa una fracción de su energía a cada momento. Este último es el caso general en la naturaleza observable, debido a la existencia de movimientos incontrolados e incontrolables de los constituyentes microscópicos del sistema, que con sus choques van convirtiendo a

cada momento una fracción del movimiento colectivo (o medio) en nuevo movimiento desordenado. La suma de todas las energías de los movimientos desordenados de las partes se llama energía disipada, mientras que la energía total del movimiento que se mueve como un todo con el sistema macroscópico se llama energía mecánica del sistema.

Un sistema disipativo que no importe energía nueva y ordenada de su entorno tiende a un desorden máximo de sus partes constituyentes, tal como lo expresa el segundo principio de la termodinámica. Tales sistemas tienen una gran cantidad de movimiento desordenado de impredecibilidad máxima en sus constituyentes (*caos molecular*) pero a la vez son de predecibilidad máxima a nivel macroscópico.

Podemos llamar sistemas de complejidad mínima a estos sistemas que a nivel macroscópico son predecibles de manera completamente determinista y además tienen pocos grados de libertad (pocas variables macroscópicas). Ejemplos serían el citado gas aislado en una caja o el planeta que gira en torno a una estrella. Por el contrario, llamaremos sistemas de complejidad crecientemente alta a sistemas como una galaxia, una célula, el sistema inmunológico o una sociedad humana (figura 1). Los grados de libertad macroscópicos de estos sistemas son crecientemente mayores, de ahí que la cantidad de información necesaria para describir el estado del sistema sea también crecientemente mayor. El comportamiento microscópico futuro de estos sistemas no es ni tan predecible como el de un planeta ni tan impredecible como los constituyentes de un gas, sino algo intermedio.

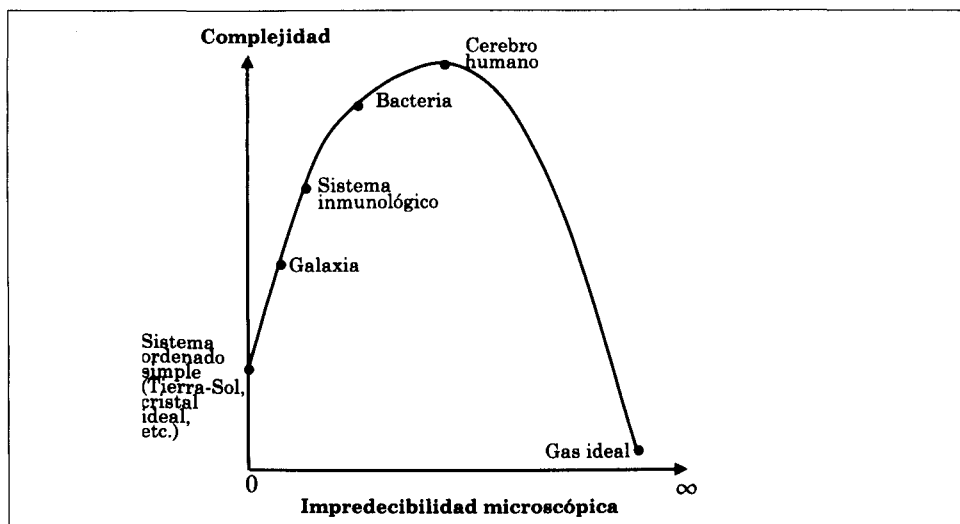


Figura 1. Complejidad macroscópica frente a desorden microscópico de varios sistemas naturales.

Se observa que todos estos sistemas intermedios, de complejidad alta, son disipativos y abiertos a la energía. Todos los sistemas disipativos generan atractores,

esto es, regiones particulares del espacio de fases hacia las cuales las trayectorias se acercan de modo continuo o en las cuales la trayectoria permanece. Análogamente a las rutinas animales o a las manías de los humanos, los atractores dan cierta predecibilidad intermedia a los sistemas disipativos. Pero a la vez les ofrece una diversidad potencial de forma y de comportamiento muy amplia, pues hay atractores muy variados: estacionarios, cíclicos, multicíclicos y caóticos, y cada atractor puede inestabilizarse convirtiéndose en otro ante pequeños cambios ambientales o ante la aparición de nuevos elementos con los que interaccionar.

Desde Leibniz hasta hace unas décadas la convicción era que el universo debía ser concebido como un sistema dinámico determinista e integrable. También como un dechado de Orden estático programado desde toda la eternidad. Hoy, estas convicciones ya no se mantienen.

La ciencia del siglo XIX produjo también la evidencia de dos clases de procesos deterministas: los reversibles, ampliamente estudiados por la dinámica y por la termodinámica, y los irreversibles, estudiados por la termodinámica irreversible y la teoría de la evolución.

La termodinámica de Clausius nos habla de un universo que debe encaminarse irreversiblemente hacia una «muerte térmica», por lo que autores posteriores concluyeron que para que existan hoy estructuras materiales organizadas el universo debió poseer un tremendo orden en su inicio.

La visión de Clausius fue recogida por investigadores de este siglo, incluso en las Ciencias Sociales. Levy Strauss nos dice por ejemplo en *Tristes Trópicos*: «Las instituciones, los hábitos y las costumbres, a cuyo inventario y comprensión he dedicado mi vida, son un pasajero florecimiento de una creación respecto a la cual no tienen sentido ninguno, salvo tal vez el de permitir a la humanidad desempeñar su papel. Pero (...) el esfuerzo del hombre no es el de oponerse en vano a una universal decadencia, sino que él mismo aparece como una máquina, tal vez más perfeccionada que otras, que trabaja para la desintegración de un orden original y precipita una materia poderosamente organizada hacia una inercia cada vez mayor y que un día será definitiva».

Los procesos irreversibles estudiados por Clausius y luego por Boltzmann eran sin embargo muy distintos de los estudiados por Darwin en sus observaciones sobre la evolución de las especies. Los primeros conducen a la larga a los sistemas cerrados a la muerte termodinámica de la máxima entropía; los segundos, llevan a la selección natural de variaciones individuales azarosas, lo cual incrementa a la larga la complejidad e improbabilidad a priori de las estructuras.

En cualquier caso, la física clásica consideraba los sistemas reversibles y deterministas como la regla, y lo casual e irreversible como casos excepcionales: métodos ad hoc introducidos euristicamente por el hombre, para paliar una desinformación probablemente momentánea [Prigogine y Stengers 1979].

2. UN NUEVO PARADIGMA

A lo largo de los últimos 30 años, y a diferencia de lo que podríamos llamar «el paradigma clásico», se han ido generando nuevas evidencias que podrían resumirse en los siguientes aspectos:

1. Tal como demostró Poincaré, la predicción determinista sólo es aplicable a unos pocos ejemplos académicos de sistemas hamiltonianos integrables:

- El sólido rígido
- El oscilador armónico
- La palanca y otros problemas mecánicos
- La colisión elástica
- El flujo laminar
- El problema de los dos graves
- La acción/reacción entre dos sistemas

Fuera de estos ejemplos, la mayoría de los sistemas disipativos y no-disipativos (i) tienen soluciones no integrables, (ii) son inestables ante variaciones de las condiciones iniciales y (iii) sufren roturas de simetría o «bifurcaciones» (ante variaciones de los parámetros que controlan su dinámica y/o ante perturbaciones externas).

2. La relación persistente entre elementos independientes genera propiedades emergentes (como las capacidades de los seres vivos) causadas no solo por las propiedades de los elementos sino sobre todo por las relaciones entre ellos.

Estas propiedades emergentes, resultado de la historia pasada de los sistemas, son la base de la articulación de estructuras de nivel superior de complejidad: partículas fundamentales → nucleones → átomos → moléculas → moléculas autocatalíticas (ARN) → citoplasmas autorreplicativos → colonias de células que se mueven juntas (cuerpos animales).

Este despliegue temporal de estructuras cada vez más complejas no puede ser predicho por los modelos de la ciencia clásica, en los que el tiempo es un parámetro reversible y no histórico.

Ni tan siquiera está claro que haya «ladrillos últimos»: La mayoría de las partículas elementales no parecen constituir estructuras permanentes como el atomismo de Diderot y Demócrito habían augurado. Mas bien asemejan «estados metaestables» de campos previos con los que interactúan.

3. Se observa que el «ruido» y el «azar» pueden ser creadores de orden una vez que hay algo inhomogéneo sobre lo que puedan actuar (y pudieran ser acaso los Creadores del Orden), como muestra el experimento imaginario de Von Foerster (figura 2). Podríamos denominar a estos sistemas, «sistemas auto-organizados».

4. Se asiste al descubrimiento de la formación espontánea en la naturaleza de estructuras espacio-temporales organizadas, mediante el establecimiento de pautas cooperativas entre estructuras más elementales, en sistemas disipativos que intercambian energía, materia e información con el medio. Este proceso se inicia en 1958 con el descubrimiento de la reacción de Belousov-Zhabotinskii y culmina con los primeros modelos matemáticos de la formación de estructuras disipativas por I. Prigogine (premio Nobel en 1977) [Glandsdorf y Prigogine 1971] [Nicolis and Prigogine, 1977] y la fundación de la Sinérgica por H. Haken [1977].

Prigogine y Nicolis denominaron a estos sistemas, «sistemas autoorganizativos» («Self-organizing systems»).

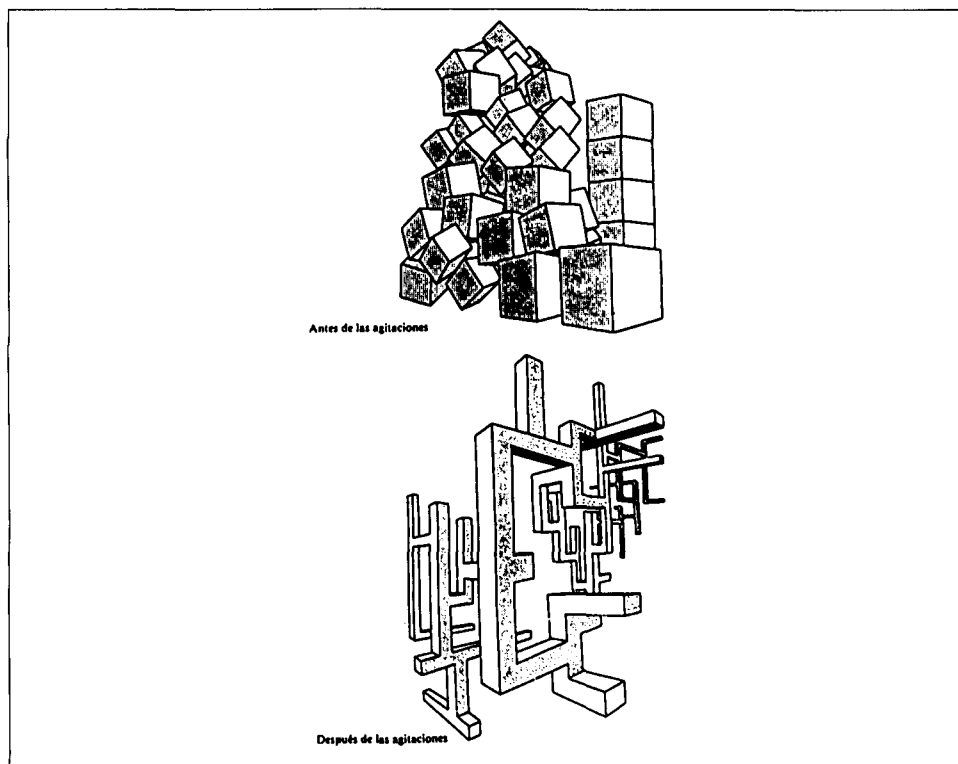


Figura 2. Estructura ordenada formada al agitar un conjunto de imanes ligeros, según VonFoerster. Fuente: VonFoerster, 1984.

5. La cosmología moderna no ha detectado ese tremendo orden originario que supusieron Clausius y otros, sino mas bien un estado bastante indiferenciado. La historia de las galaxias, estrellas y seres vivos no es la de la degradación del orden, sino la historia de la creación del orden. Las causas eficientes de la creación de estructuras materiales son las fuerzas de gravitación, electromagnética y nuclear fuerte. El campo de fuerzas transforma en energía una parte de la masa de las partículas que caen bajo su alcance y expulsa esa energía en forma de fotones.

Si por estas fuerzas fuese, todos los núcleos serían de hierro, todos los átomos serían «gases nobles», CO_2 u H_2O y todos los astros serían agujeros negros. Sin embargo, sólo hay un átomo de hierro por cada 100.000 y no mas del 1% de la masa es de agujeros negros.

El elemento que falta es el descubrimiento de Prigogine de que el encuentro de estructuras materiales en situaciones de desequilibrio crea diversidad nueva. En el equilibrio térmico, se cumple el llamado «equilibrio detallado» estadístico, entre partículas que se unen en estructuras y estructuras que se desintegran en partículas. Fuera del equilibrio, o sea en presencia de flujos o de rápidas variaciones

temporales de la energía o materia interna de un sistema, el equilibrio detallado no se cumple, y se puede producir la autoorganización.

Según Reeves, la fuente última de todos los demás desequilibrios es la rápida expansión del universo, y las condiciones que ésta ha impuesto a la materia, a la que ha dotado de una entropía potencialmente utilizable (nuclear y gravitatoria inicialmente).

La observación cosmológica nos permite descubrir un universo en expansión y en continuo enfriamiento, que acrecienta las diferencias de temperatura entre las estrellas y el fondo del cielo. Gracias a este vasto movimiento de conjunto, en vez de acercarnos a una «inercia definitiva» nos alejamos cada vez más de ella [Reeves 1987].

Por tal motivo, si por algún motivo azaroso se han engendrado en medio de la expansión, estructuras ordenadas, la continuación de la expansión no hace sino alejar más y más del equilibrio global a estas, facilitando su evolución hacia estados cada vez más improbables.

Por otra parte, el universo parece haber evolucionado a entropía aproximadamente constante los últimos 15.000 millones de años (desde la llamada «catástrofe» del plasma), de modo que no hay ninguna evidencia experimental clara de que se produzca realmente un aumento global del desorden, aunque esto no puede ser descartado tampoco y es en todo caso secundario en relación a la formación de complejidad local.

Este conjunto de evidencias está contribuyendo a llevar a la ciencia actual a una nueva síntesis de metáforas y observaciones que tratan de captar con mayor realismo la auténtica complejidad de los objetos científicos. Tres escuelas destacan como líderes de esta nueva síntesis: la escuela de Nicolis y Prigogine, de la Universidad Libre de Bruselas; la escuela de la *sinérgica* de Herman Haken, de la Universidad de Stuttgart y el Instituto de Santa Fe, en EEUU.

A ello no puede ser ajena la sociología, por varias razones. En primer lugar por su pretensión de constituirse en ciencia fundamentada empíricamente y metodológicamente coherente, al igual que otras ciencias ya establecidas, y coherente con el resto de las ciencias empíricas. En segundo lugar, porque su objeto de estudio no parece separable de otros objetos de conocimiento científico, salvo en su mayor grado de complejidad. Y finalmente, porque muchas de las contribuciones a la citada síntesis proceden como veremos del estudio de procesos sociales complejos.

3. EL PARADIGMA DE LA AUTOORGANIZACIÓN Y LA SINÉRGICA. AL ORDEN MEDIANTE LAS FLUCTUACIONES

Prigogine distingue entre los sistemas aislados, los sistemas cerca del equilibrio y los sistemas lejos del equilibrio.

En sistemas aislados, la entropía crece monótonamente hasta alcanzar un máximo. El sistema permanece eternamente en tal estado, en que gradientes y flujos se anulan a la vez. En tal estado, las variables macroscópicas permanecen

estacionarias en valor medio, salvo fluctuaciones estadísticas, fluctuaciones que podrán ser tanto mayores cuanto más alta sea la densidad de energía que guarde el sistema.

Los sistemas abiertos pueden estar cerca o lejos del equilibrio.

Los cercanos al equilibrio son aquellos donde se puede suponer equilibrio local en alguna escala de tamaño mesoscópica, esto es, en una escala intermedia entre lo micro y el sistema completo, y donde, por tanto, vale la aproximación hidrodinámica y los flujos son proporcionales a las fuerzas generalizadas (gradientes o afinidades químicas) a través de constantes llamadas *coeficientes de transporte*.

En sistemas cerca del equilibrio, Prigogine demostró que se cumple el teorema de la mínima disipación de entropía: el sistema evoluciona hacia un estado estacionario en el que la producción de entropía es la mínima compatible con las restricciones que se le están imponiendo al sistema desde fuera. Un ejemplo de estas restricciones sería obligar al sistema a mantener su presión y concentración de materiales constituyentes constantes en todos sus puntos.

Para Prigogine, los sistemas lejanos al equilibrio son aquellos donde los gradientes se hacen tan grandes que los flujos y gradientes empiezan a cooperar entre sí a través de relaciones no lineales. Comienza a producirse esta situación cuando los coeficientes de transporte pasan a ser dependientes de las variables macro y a mas altos gradientes aún, cuando la relación entre flujos y gradientes se vuelve no-lineal. También se produce cuando hay tasas no lineales de producción de materia.

En sistemas lejos del equilibrio, se pueden producir estructuras disipativas. Éstas comienzan siendo una fluctuación estadística microscópica que, por sobrepasar un umbral de inestabilidad, comienzan a amplificarse a costa de los flujos de energía y materia de su entorno, antes de ser frenada por la interacción con ese entorno. La nueva disipación «estacionaria» de entropía que así se genera «rompe todas las previsiones» del principio de mínima producción de entropía, porque aparecen nuevos mecanismos para el transporte macroscópico de energía y calor. A diferencia con las dos situaciones previas, aquí los flujos y la disipación dejan de ser exclusivamente microscópicos y mesoscópicos.

Fue paradójico que la insistente búsqueda de una generalización lejos del equilibrio del teorema de mínima producción de entropía condujera a Prigogine al descubrimiento de estructuras que se oponían al mismo.

El primer ejemplo histórico real de estructura disipativa fue la reacción de Belúsov-Zhabotinski, descubierta a finales de los 50 [Zhabotinski 1964].

El asombro que produjo esta reacción se debe a que solemos pensar que las reacciones químicas son sólo el resultado de colisiones al azar de moléculas que se difunden. Sin embargo, cuando se mezclan las moléculas de ácido malónico con las de sulfato de cerio en la reacción citada, se produce una oscilación periódica de color azul a rojo y viceversa, como un reloj químico. Las moléculas se sincronizan para producir unos productos intermedios u otros, cíclicamente.

La serie de figuras número 3 muestra distintos momentos de la reacción.

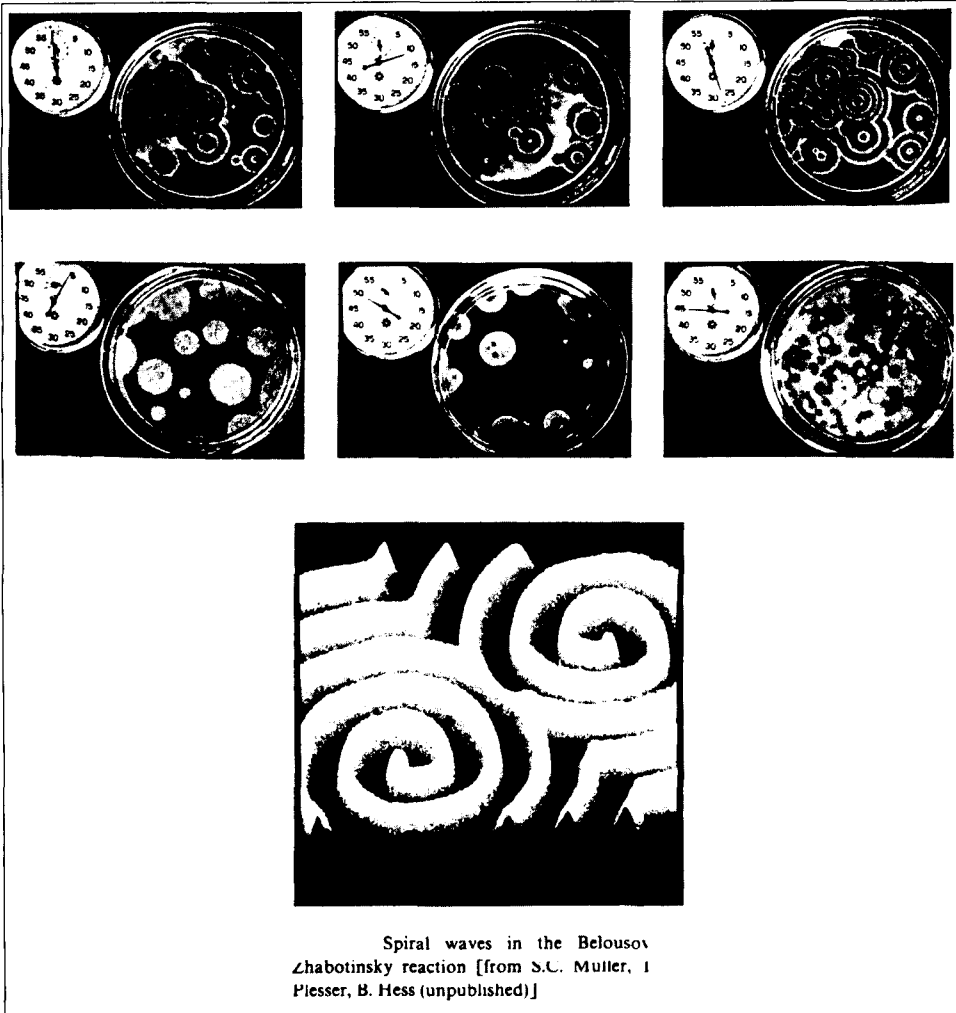


Figura 3. Algunas pautas espaciales generadas por la reacción de Belousov-Zhabotinsky.
Fuente: Smoes, 1980.

Se trata de un proceso de reacción-difusión del tipo:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = A + X^2Y - BX - X + D_x \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = BX - X^2Y + D_y \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \quad (2)$$

donde r es la posición, t el tiempo, X e Y la concentración de las dos principales sustancias en reacción, y D_x , D_y sus difusividades respectivas.

Las ecuaciones anteriores no son sin embargo exactamente las correspondientes a la reacción de Belusov-Zhabotinski, sino al modelo, más simple, denominado Brusselator.

Este modelo conserva varias de las propiedades del de Belusov-Zhabotinski, como la de poseer ciclos estacionarios y también gradientes espaciales de concentración, siendo más simple de resolver matemáticamente.

La serie de figuras número 4 muestra la aparición de distintos atractores estables del comportamiento ante distintas configuraciones de los valores de los parámetros D_x , D_y , a y b :

(i) Si los coeficientes de difusión son muy grandes, el sistema permanece homogéneo, aunque puede cambiar del estado estacionario constante a una oscilación autosostenida de las concentraciones X e Y (hay un atractor estable de tipo «ciclo limite»). Es el reloj químico.

(ii) Si la difusión no es lo bastante alta, el sistema pierde la homogeneidad, apareciendo ondas viajeras de concentración o bien ondas químicas estacionarias.

(iii) Para ciertas combinaciones de parámetros se obtiene un estado estacionario en el que X e Y se distribuyen de forma no homogénea.

La inhomogeneidad espacial genera en general una polaridad, fenómeno que ha recibido gran atención, pues parece ser clave en los procesos tempranos de morfogénesis en el desarrollo embrionario.

(iv) las estructuras inhomogéneas anteriores pueden adoptar una configuración localizada en una región pequeña, fuera de la cual el sistema sigue estando en la «rama termodinámica» cercana al equilibrio.

Tras la reacción de Belousov-Zhabotinsky y el Brusselator se descubrieron y modelaron otros muchos sistemas de reacción-difusión posibles.

Reflexionando sobre estas reacciones químicas, Prigogine y Glandsdorf llegaron a la conclusión de que la participación de procesos químicos implica la intervención de leyes cinéticas no lineales, del tipo de etapas catalíticas y feedbacks en las cinéticas químicas. Ante estas no-linealidades, la estabilidad de la rama termodinámica no está asegurada.

También el que las variables macroscópicas, como la densidad, o los parámetros de control (como la difusividad o las tasas de reacción), dependan de la temperatura (otra propiedad macroscópica), introduce términos no lineales en sus ecuaciones de evolución. Esto es frecuentemente el caso en la combustión y otras reacciones químicas muy energéticas.

El estado estacionario puede sufrir una inestabilización, tras la que el sistema reestructura todas sus fuerzas y flujos y aumenta de orden y de producción estacionaria de entropía. Sin embargo, la rotura espacial y temporal de simetría se produce de modo distinto en distintos sistemas no-lineales.

Resumamos las características de estos sistemas: Las estructuras disipativas muestran creación espontánea (no buscada por el observador humano) de inhomogeneidad y cambios cualitativos donde todo era homogéneo y estable.

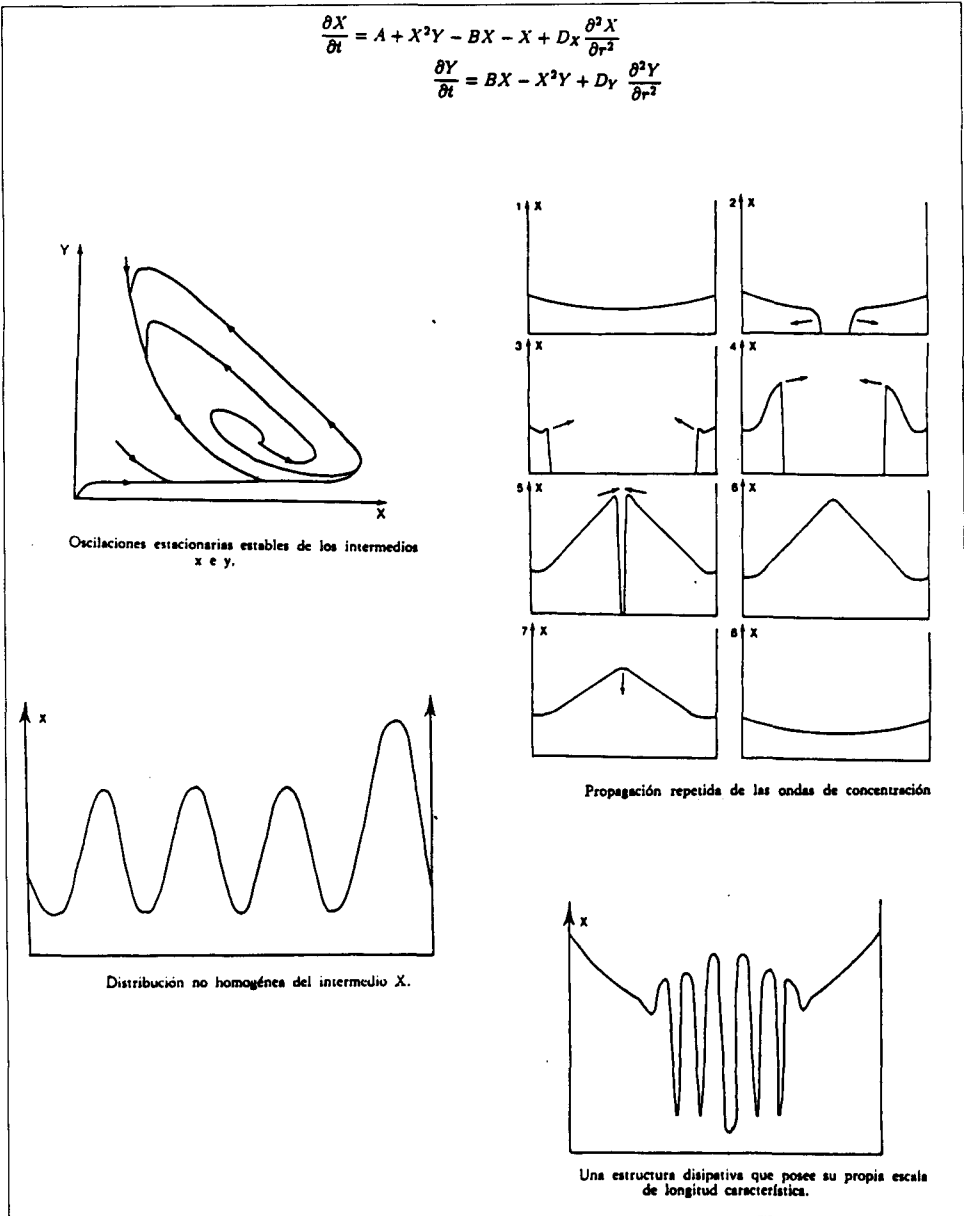


Figura 4. Algunas pautas espacio-temporales obtenidas de la resolución de las ecuaciones de la parte superior de la lámina (Brusselator). Fuente: Prigogine, 1972.

Son sistemas alejados del equilibrio y abiertos a la energía y materiales externos, por lo que no son hamiltonianos.

Sus variables macroscópicas interactúan de un modo no-lineal. Ello implica que habiendo más de dos variables (y una variable que varía espacialmente equivale a infinitas variables, una por cada punto) el sistema puede generar atractores estacionarios, ciclos límite, ciclos múltiples y/o atractores caóticos.

La estructura disipativa se produce cuando el sistema, que estaba en el clásico estado estacionario típico de todo sistema termodinámico abierto, (i) pierde la estabilidad y (ii) cae en uno de estos atractores de igual o mayor complejidad.

¿Cómo se produce la inestabilización del sistema? Prigogine distingue dos formas: (a) por cambio en los parámetros externos que controlan los flujos, fuerzas termodinámicas, interacciones entre las partículas o probabilidades de interacción entre los subsistemas («inestabilidades sinérgicas» sistematizadas posteriormente por H. Haken), o (b) por inestabilidad estructural ante la aparición de nuevos componentes y/o nuevas interacciones («inestabilidad estructural ante la aparición de nuevas variables»).

Obsérvese que en las inestabilidades sinérgicas, el sistema puede volverse inestable porque se modifiquen las probabilidades de interacción entre sus subsistemas constituyentes (por ejemplo, partículas) y no sólo por modificación de las ligaduras externas. Esto es de gran importancia, pues tales probabilidades de interacción pueden estar siendo modificadas por alguna de las emergencias macroscópicas generadas por la interacción micro.

Aún no se ha podido encontrar una ley universal válida para la evolución de cualquier sistema alejado del equilibrio. Lo más que se puede hacer es construir el diagrama de bifurcaciones e inestabilidades para cada sistema particular. Al hacerlo, conviene tener en cuenta que: (i) el sistema puede ser sensible a influencias no consideradas al escribir las ecuaciones; (ii) no siempre se puede aislar el sistema de la aparición de nuevos elementos y/o interacciones a nivel microscópico; (iii) hay que considerar, además, las fluctuaciones de las variables que consideramos relevantes y el peso relativo de las fluctuaciones accesibles en torno a la trayectoria en el espacio de fases del sistema: $P(\mathbf{x}, t)$. Si no hubiera fluctuaciones, P sería una distribución de varianza prácticamente nula siempre. Las influencias microscópicas y su forma estadística se convierten en determinantes en momentos en que un atractor se convierte en inestable o se bifurca. Por ello, en tales momentos las descripciones macro y mesoscópica se vuelven insuficientes, y se suele recurrir al uso de ecuaciones de balance de la probabilidad del estado macro en función de las posibles influencias micro. Las ecuaciones *master* y *Fokker-Planck* han sido muy utilizadas a este respecto. Son ecuaciones que cuantifican cómo se difunde y se trasladan las probabilidades altas de unos intervalos de valores a otros.

En efecto, en el momento en que se produce la inestabilidad de un atractor, surgen tres problemas. El primero es deducir una ecuación de evolución de la probabilidad de las distintas fluctuaciones en torno a la trayectoria más probable del sistema ($P(\mathbf{x}, t)$) que se reduzca, en algún límite apropiado, a la descripción macroscópica. El segundo es describir el comportamiento estadístico de las fluctuaciones alrededor de las soluciones estables de las ecuaciones macroscópicas que se alcanzara a largo plazo ($t \rightarrow \infty$). El último es obtener la evolución de P hasta su nuevo estado estable.

El segundo supone un complejo problema estadístico, en el que se suelen emplear modelos *ad hoc*. En Ciencias Sociales, esto implicaría el estudio experimental estadístico de situaciones análogas a la estudiada, o bien el uso de modelos heurísticos que relacionaran los comportamientos microsociales más probables con los efectos macroscópicos generados.

Los otros dos problemas se suelen abordar mediante la ecuación de propagación de la probabilidad en procesos markovianos, o ecuación master.

En otro lugar [García-Olivares 1999] ilustraremos estas técnicas con algún detalle.

4. INESTABILIDAD ESTRUCTURAL Y PROCESOS EVOLUTIVOS

En la sección anterior se dieron algunos ejemplos de inestabilidad sinérgica en sistemas químicos. En ésta nos centraremos en un ejemplo de inestabilidad estructural ante la aparición de nuevas variables de gran importancia: La evolución de los ecosistemas.

Tomaremos como ejemplo un ecosistema con varias especies que se nutren de un mismo recurso, o de distintos recursos.

En el modelo mas sencillo, las tasas de crecimiento de las poblaciones x_1 , x_2 y x_3 de tres especies que comparten un mismo recurso, vienen dadas por:

$$\frac{dx_1}{dt} = K_1 x_1 (N_1 - x_1 - x_2 - x_3) - d_1 x_1 \quad (3)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = K_2 x_2 (N_2 - x_1 - x_2 - x_3) - d_2 x_2 \quad (4)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = K_3 x_3 (N_3 - x_1 - x_2 - x_3) - d_3 x_3 \quad (5)$$

donde los K_i , d_i son las tasas de natalidad y mortalidad respectivamente de la especie i , y N_i es la medida de la capacidad de saturación (o «sustentación») del medio.

En los modelos de evolución biológica, hay que tener en cuenta los aspectos de a) Reproducción, b) Selección y c) Variación.

En el modelo de arriba, la reproducción esta representada por el crecimiento «autocatalítico» $K_i x_i$, $i = 1, 2, 3$, la selección se produce por el límite impuesto al crecimiento por la constante N , y sólo falta tener en cuenta la posible *aparición de nuevas especies o tipos* [Prigogine, 1972].

Supongamos que en un ecosistema hay sólo una especie x_1 , explotando el recurso, pero que por determinado accidente o mutación, surge una variedad distinta x_2 en el mismo nicho ecológico. La especie x_2 puede poseer valores distintos de los parámetros K , N y d y además puede que explote distintos recursos alimenticios, que Prigogine expresa introduciendo el factor β , y $0 \leq \beta \leq 1$. Si $\beta = 1$,

la nueva especie utiliza los mismos recursos que x_1 , mientras que si $\beta = 0$, no viven de los mismos recursos. Para β entre 0 y 1, hay una superposición parcial.

Las ecuaciones para el sistema serían:

$$\frac{dx_1}{dt} = K_1 x_1 (N_1 - x_1 - \beta x_2) - d_1 x_1 \quad (6)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = K_2 x_2 (N_2 - x_2 - \beta x_1) - d_2 x_2 \quad (7)$$

y el estado estacionario existente, antes de la aparición del mutante, es:

$$x_1^0 = N_1 - d_1 / K_1 \quad x_2^0 = 0 \quad (8)$$

Puede demostrarse [Prigogine, 1977] que para que se produzca el crecimiento de la nueva población, hace falta que ésta catalice positivamente su propia producción:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial x_2} \right)_{x_1=x_1^0, x_2} = 0 > 0 \quad (9)$$

siendo G el segundo miembro de la ecuación para x_2 .

En nuestro caso, esta condición equivale a:

$$N_2 - \frac{d_2}{K_2} > \beta \left(N_2 - \frac{d_2}{K_2} \right) \quad (10)$$

Si la mutación ocupa el mismo nicho que la antigua especie ($\beta = 1$), el sistema evoluciona hacia el estado estacionario estable $x_1^0 = 0$, $x_2 = N_2 - d_2/K_2$. La especie antigua se ha extinguido. Sucesivas mutaciones en el mismo nicho serán rechazadas para valores de «N-d/K» inferiores a los preexistentes, mientras que reemplazarán a este tipo si «N-d/K» resulta ser superior al preexistente. La evolución conduce en este caso a una explotación creciente del recurso, en la forma que muestra la figura 5.

Es notable que este tipo de figuras hubiera sido observada en estudios independientes del análisis de Prigogine, como los estudios sobre la implantación de novedades tecnológicas, la evolución de la producción social de energía (Boulding), y otros.

En el caso de que la nueva especie difiera de la antigua en su elección de recursos ($\beta = 0$), la nueva población crecerá hacia un estado estacionario final dado por: $x_1^0 = N_1 - d_1/K_1$, $x_2^0 = N_2 - d_2/K_2$.

En el caso intermedio, se dan dos casos:

Si: $\beta(N_2 - d_2/K_2) > (N_1 - d_1/K_1)$. entonces x_2 reemplaza a x_1 y la población final es mayor que la inicial. En caso contrario, la nueva población crece en coexistencia con la antigua, y el estado estable final es:

$$x_1^0 = \frac{\left(N_1 - \frac{d_1}{K_1} - \beta \left(N_2 - \frac{d_2}{K_2} \right) \right)}{(1 - \beta^2)} \quad (11)$$

$$x_2^0 = \frac{\left(N_2 - \frac{d_2}{K_2} - \beta \left(N_1 - \frac{d_1}{K_1} \right) \right)}{(1 - \beta^2)} \quad (12)$$

y la población total de nuevo será mayor que la antigua.

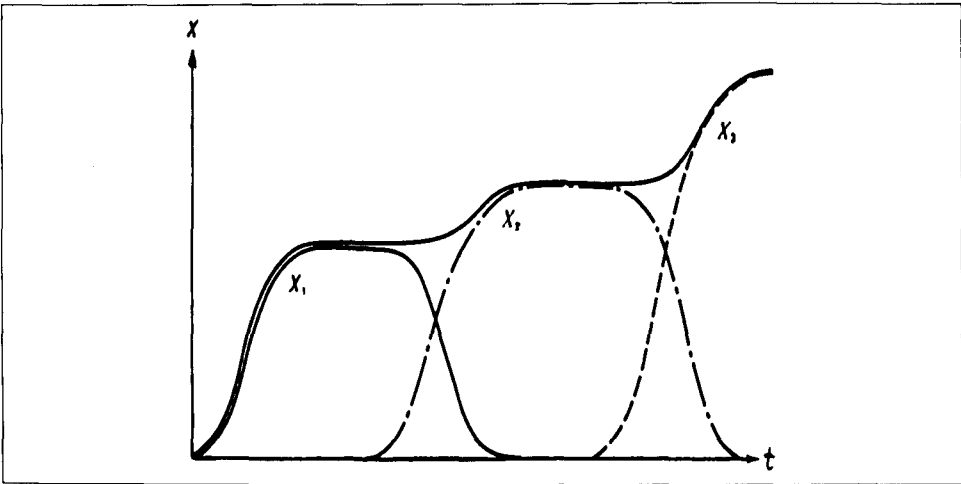


Figura 5. Explotación creciente de un recurso por especies sucesivamente más eficientes según se deduce del modelo matemático de (Nícolis y Prigogine 1977). Véase texto.

Estudios basados en esta clase de modelos, han ido mas allá de este sencillo modelo, introduciendo «diálogos» más complejos entre más especies antiguas, más innovaciones e incluso el importante parámetro de la distribución espacial de éstas.

Modelos de esta clase basados en los trabajos de Maynard-Smith [Maynard-Smith, 1988], han permitido llegar a conclusiones como las siguientes:

- Los sistemas ricos en todo tipo de recursos, en los que cada recurso esta ampliamente distribuido, tienden a favorecer la evolución de especies que solamente explotan una reducida parcela de recursos (las «especialistas», como el lince), mientras que los sistemas en que cada recurso esta poco difundido, fomentan la evolución de «generalistas» (como el zorro).
- Cuanto mayor es la fluctuación de los recursos del medio, mayor es la separación por nichos y menor la superposición de varias especies en cada nicho.
- Los ecosistemas ricos en recursos que no experimenten grandes fluctuaciones contarán con mayor número de especies (piénsese en los bosques tropicales). Las fluctuaciones ambientales reducirán este número.
- Un sistema con recursos escasos dispersos, estará, si sus densidades no fluctúan enormemente, poblado por bastantes especies «generalistas», con una notable superposición de nichos, mientras que si las fluctuaciones son grandes, estará habitado por unas cuantas especies generalistas.

5. OTRAS ÁREAS DE APLICACIÓN DE LA SINERGÉTICA

El paradigma de la autoorganización y la sinérgica ha contribuído notablemente a cambiar la imagen clásica que se tenía de los procesos de aparición del orden y de la evolución de los sistemas complejos en la naturaleza.

Las estructuras disipativas muestran por vez primera que la evolución darwiniana no se oponía en realidad a las leyes de Carnot-Clausius, como se había pretendido a finales del XIX.

La evolución estructural es posible debido a que la dispersión de las nuevas estructuras organizadas (dispersión garantizada por el segundo principio de la termodinámica) provoca encuentros entre propiedades emergentes. Esto implica nuevas posibilidades de interacción colectiva, algunas de las cuales resultan ser auto-organizativas, y así sucesivamente.

Parece existir, pues, por doquier, un ciclo creador [Morin 1986]:

**Desorden → Encuentros → Interacciones → Organización → Orden
estructurado → Desorden**

Este ciclo constituye un motor generador de improbabilidades locales a costa del decrecimiento no local de lo improbable que dicta el segundo principio de la termodinámica (en su interpretación por Boltzmann).

Esta evidencia ha llevado a algunos autores (como Edgar Morin) a afirmar que el segundo principio de la termodinámica es en realidad «medio principio» y debería ser superado mediante una formulación más general.

Por otro lado, toda estructura tiene su tiempo característico de estabilidad ante cierto espectro de perturbaciones externas y fluctuaciones internas. Pero ninguna estructura está inmunizada a priori contra cualquier fluctuación. Por tanto, toda estructura, incluso las «partículas elementales», deberían ser consideradas como estados «metaestables».

La propia órbita Tierra-Sol no ha podido demostrarse que sea estable ante las perturbaciones de los otros planetas. Sí parece serlo para tiempos del orden de 4.000 millones de años, aunque la predecibilidad de la posición de la Tierra desde condiciones iniciales no parece ser mayor de unos 600 millones de años.

Hay una amplia variedad de campos y problemas en que las aportaciones de la sinérgica están aún poco formalizadas pero parecen muy prometedoras. Por ejemplo, y sin intención de ser exhaustivos, podemos mencionar: los problemas de crecimiento de cristales ante enfriamientos rápidos, el origen de las primeras células simples (bacterias o «moneras»), la autoproducción (o «autopoiesis») de las células vivas, la evolución de las células y de las colonias de células (o seres pluricelulares), la organización de las colonias de células que no siempre viven juntas, como las de la ameba «Dictyostelium Discoideum», la morfogénesis de las colonias de células que no se separan tras reproducirse (o «embriología»), la construcción de realidad por sistemas artificiales y naturales, las paradojas perceptivas como lucha entre atractores cognitivos y los comportamientos sociales de los animales.

Vamos a describir brevemente algunos de los estudios citados que pueden tener una particular relevancia como fuente de inspiración para la descripción de los procesos complejos en sistemas sociales.

5.1. Origen de las primeras células simples

Las bacterias, o moneras, parecen ser las primeras células vivas que evolucionaron sobre este planeta.

Su origen no puede rastrearse en el registro fósil, sin embargo, algunos procesos autoorganizativos que tienen lugar entre moléculas como las de los jabones o la de los fosfolípidos, parecen constituir una parte fundamental de su origen.

En efecto, las moléculas de las sustancias citadas se caracterizan por poseer «dos amores»: la parte de la «cabeza» de la molécula es atraída por el agua, mientras que la parte de la cola es repelida por el agua. De ahí que al ser agitadas por un ruido externo de suficiente amplitud, se autoorganicen en alguna de las formas mostradas en la parte superior de la figura 6. El efecto espumante y el efecto detergente derivan de esas formas de autoorganización. En cuanto a la organización en bicapa, resulta ser la estructura de todas las células animales y vegetales.

Vemos de nuevo, cómo bastan dos tendencias distintas (emergentes de una organización o de organizaciones distintas) mas un poco de ruido, para generar nuevas estructuras organizadas o bien organizativas. Vimos ya otro ejemplo antes con los cubos imantados de Von Foerster, pero allí las dos tendencias distintas eran el peso de los cubos por un lado y su campo magnético por otro.

Oparin mostró cómo células de éste tipo podían haber crecido en un «caldo primitivo» precámbrico, simplemente absorbiendo por ósmosis moléculas a través de la membrana, hasta hacerse tan gordas que la tensión de la membrana no bastase, rompiéndose entonces en dos.

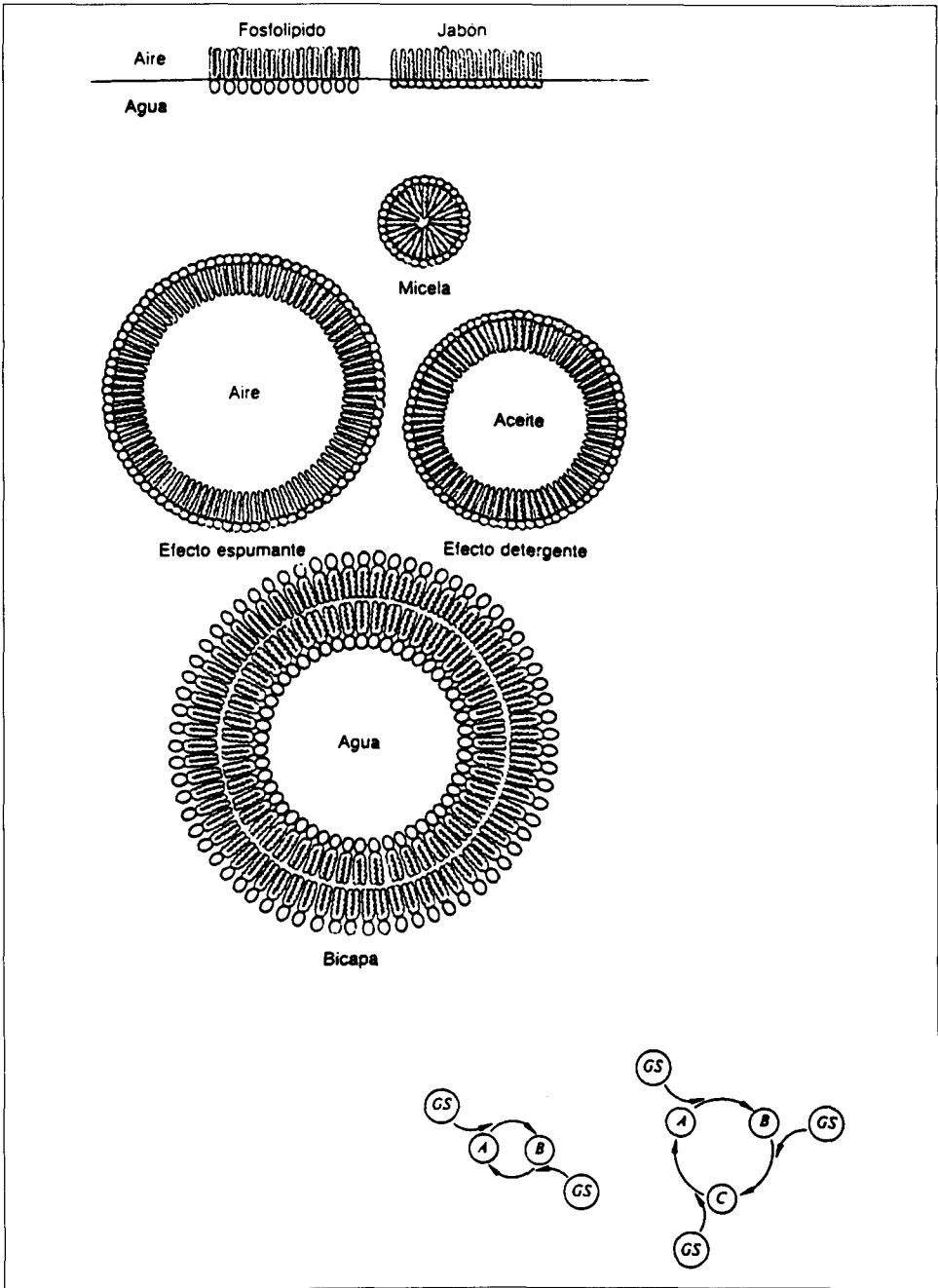


Figura 6. Las dos estructuras que se ensamblan para formar una célula simple según la teoría actual sobre el origen de las procariotas: por un lado membranas *anfifílicas* (parte superior) y por otro lado moléculas autocatalíticas (abajo) en presencia de agua. Basado en de Duve, 1988, p. 43.

Otro elemento que parece fundamental para la reproducción de las células vivas es la presencia en el interior de su citoplasma de moléculas autocatalíticas, como las de ARN y ADN, capaces de dirigir el proceso de reproducción y copia con una gran estabilidad y exactitud.

Eigen y Schuster [Eigen y Schuster 1979] ilustraron cómo podría haberse producido la evolución y selección de moléculas de ARN en el interior de los citoplasmas, mediante su modelo de los hiperciclos, en los que unas moléculas de ARN ayudan a otras y viceversa, como en variadas «mafias» alternativas, cada una de ellas cerrada a miembros externos.

Una cuestión interesante es la de si esta catálisis mutua pudo ser la causante de la alta proporción observada de ADN que no parece aportar ninguna información genética en las células. Es una hipótesis plausible. En ese caso, el ADN «inútil» habría sobrevivido simplemente porque ayudó a otros, no por las funciones que aportaba a la célula.

5.2. La autopoiesis de células vivas

Autopoiesis es el término que el prestigioso investigador Francisco Varela emplea para designar el proceso permanente de producción, por parte de las células, de la organización (y por tanto, las estructuras) necesarias a su propia existencia [Varela *et al* 1974].

Una de las fases más importantes de la autopoiesis celular es la producción y reparación permanente de la membrana celular. Si no hubiera perturbaciones y agresiones externas bastaría con la estabilidad fisicoquímica de la bicapa de fosfolípidos para asegurar la persistencia de la membrana celular, pero éste no es el caso.

La serie de figuras número 7 ilustra el modelo de Zeleny, basado en el previo de Varela, que simula cómo se podría producir tal proceso [Zeleny 1976] de producción y reparación permanente.

Como puede observarse, el modelo se basa en un conjunto muy simple de reglas de composición, desintegración y ligadura, entre elementos muy simples, llamados sustrato, catalizador, ligamento, ligadura simple y ligadura doble.

Una célula que incluya una reacción de esta clase entre las demás de su metabolismo, tiende a reparar permanentemente su membrana, aunque no disponga de nada parecido a un ojo que vigile los posibles agujeros. Es solamente una conjunción de azar y esas reglas simples la que genera una función de vital importancia para la célula.

5.3. Evolución por ensamblaje: las células complejas

Las protactistas (protozoos y células complejas parecidas) constituyen según la prestigiosa bióloga norteamericana Lina Margulis, un paso más en la jerarquía de seres compuestos de la evolución.

Estos seres pueden ser considerados, según Margulis, como ensamblajes de células de moneras más simples, que entraron en endosimbiosis.

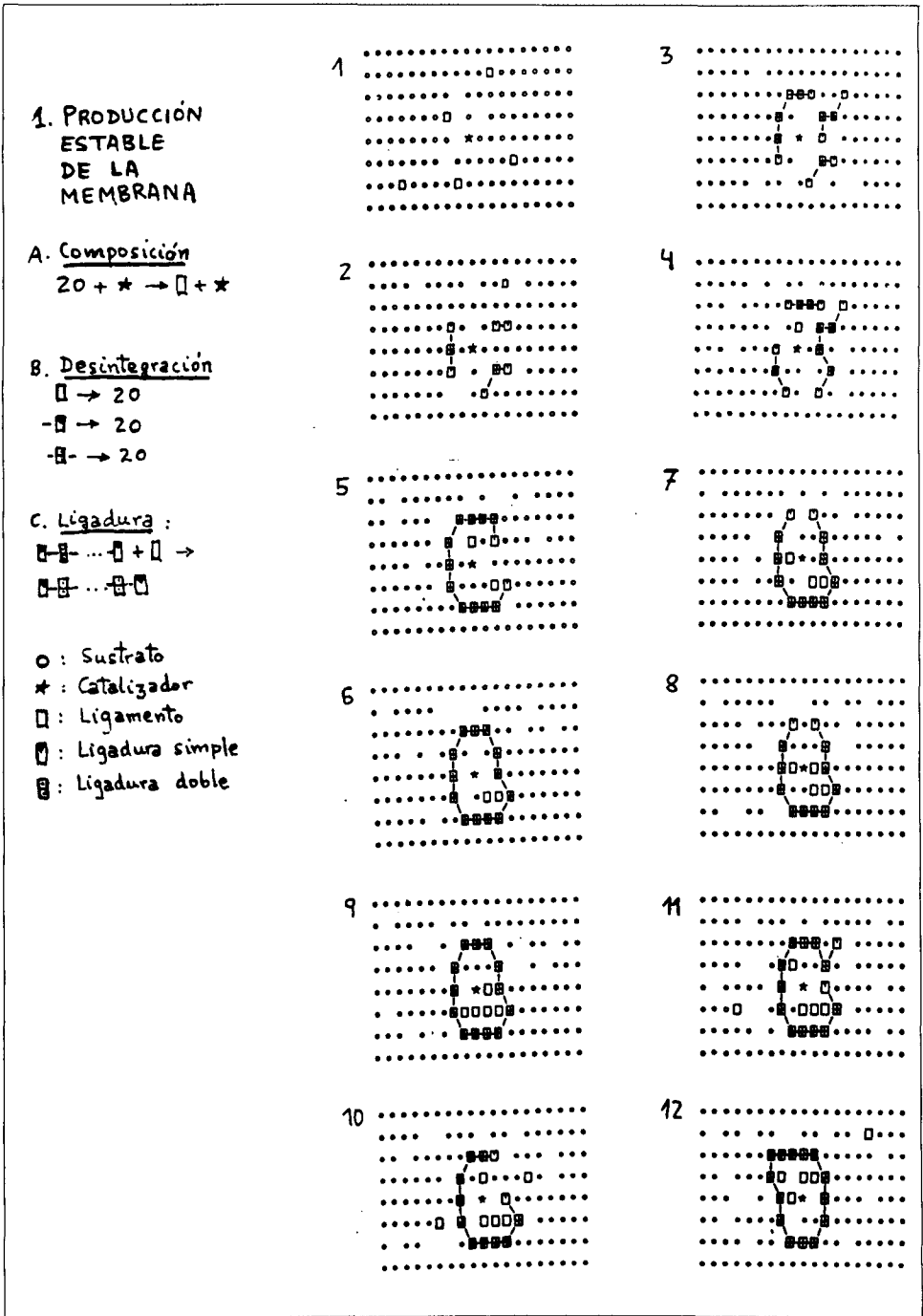


Figura 7. Producción y reparación permanente de una membrana celular según un modelo ilustrativo de Zeleny. Fuente: Zeleny 1976.

Así, la imagen al microscopio electrónico del alga pardoazulada «Phrocloron» muestra un asombroso parecido con los cloroplastos constituyentes de las células vegetales, habiéndose descubierto en estos cloroplastos material genético propio, que nada tiene que ver con el del núcleo de la célula vegetal.

La figura 8 muestra una imagen de Phrocloron, y otra de la estructura de una célula protactista típica, que para algunos autores es íntegramente un ensamblaje «quimérico» de bacterias que fueron inicialmente fagocitadas pero resultaron ser buenas simbioses internas, además de indigeribles.

Para Lina Margulis la evolución se produce no sólo ni principalmente mediante selección de lo más eficiente, sino también, y crucialmente, mediante el encuentro casual de buenos co-simbiontes.

Parece pues, si estos mecanismos se confirman, que la evolución es un ejemplo de uso sistemático de las propiedades emergentes de las estructuras autoorganizativas estables de menor nivel, para la construcción de ensamblajes que se automantienen.

Según Hejl, en un sistema que se automantiene, los sistemas autoorganizativos generan emergencias (moléculas excedentes por ejemplo) que son útiles para un sistema autoorganizativo vecino B, quien a su vez produce emergencias útiles a un sistema vecino C, y así sucesivamente hasta cerrar el bucle o hiperciclo.

Como afirma Nícolis, sólo los sistemas autoorganizativos pueden aprovechar los flujos de energía y de materiales que los atraviesan de una manera creativa: creando propiedades y modos de comportamiento nuevos. Estas propiedades macroscópicas son un efecto emergente del empujamiento al que el sistema obliga a la energía y materiales, antes de devolverlos al entorno. Ahora bien, en ese entorno puede haber otros sistemas autoorganizativos que se alimenten de esos materiales y energía desechados por el primer sistema. Y en eso consiste esencialmente un sistema que se automantiene: En un gran hiperciclo de sistemas autoorganizativos que se alimentan unos de los otros, aunque todos pueden seguir además alimentándose del entorno común a todos ellos.

El concepto de sistema que se automantiene parece bastante apropiado para describir sistemas como los biológicos, constituídos por partes tales como células, que a su vez son sistemas autoorganizativos constituídos por sistemas complejos posiblemente autoorganizativos, y así sucesivamente, en varios niveles de organización.

Una pregunta interesante es si deben necesariamente intercambiar señales los constituyentes de un sistema que se automantiene para que éste persista. Parece observarse que sí lo hacen en todos los casos. De hecho, algunos de los materiales que un sistema autoorganizativo emite y un sistema autoorganizativo incorpora actúan como señales informacionales, aunque sólo sea por la alta sensibilidad que estos sistemas tienen al cambio de sus parámetros ambientales.

El llamado «conocimiento del medio» que tienen las células y los organismos pluricelulares podría consistir en eso: en una modificación del funcionamiento químico de algunos sistemas componentes ante pequeñas variaciones de los flujos que le vienen del medio común y de otros sistemas componentes.

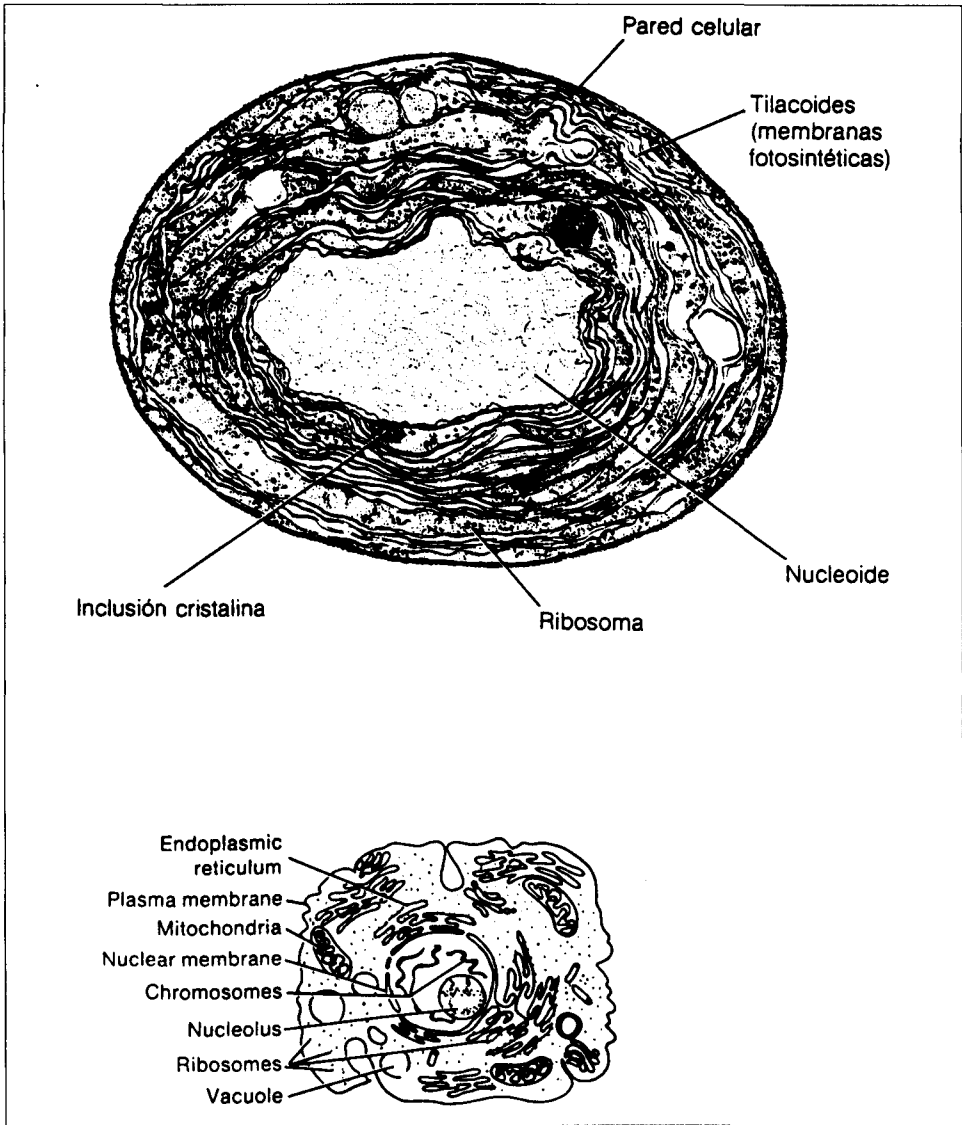


Figura 8. (a) Imagen muy aumentada del alga pardoazulada Phrocloron, cuyo parecido con un cloroplasto celular ha hecho sospechar a la comunidad científica acerca del origen real de los orgánulos celulares (de Margulis y Schwarz, 1985, p. 45). (b) Esquema de una célula compleja de un animal, según Anderson y Sobieski, 1980.

Como el intercambio de energía y materiales en los sistemas que se auto-mantienen suele tener consecuencias informacionales en sus componentes, los sistemas que se automantienen suelen ser también sistemas autorreferenciales:

sistemas en los que el cambio de estado de algunos componentes induce al cambio del estado de otras componentes, y recíprocamente. Hay un control mutuo entre las partes en lo relativo a sus cambios de estado.

Sin embargo, existen sistemas autorreferenciales que no se automantienen, como el cerebro por ejemplo, que precisa de todo un conjunto de sistemas corporales acoplados a sus necesidades metabólicas para poder subsistir.

Las células, que Varela y Maturana definieron como sistemas «autopoiéticos», pueden ser consideradas en terminología de Hejl como sistemas autorreferenciales que se automantienen.

5.4. La autoorganización de las colonias de células

El nacimiento de los seres pluricelulares de nuevo parece ser un caso de ensamblaje, en este caso de células protactistas, en forma de colonias.

Unas colonias de células protactistas se juntan y separan según las circunstancias, otras permanecen juntas casi siempre y otras no podrían vivir sino en comunidad. La figura 9 muestra un ejemplo de cada uno de estos casos: Las amebas *Dictyostelium Discoideum*, la Fragata Portuguesa y el Hombre.

Según Nicolis y Prigogine [Nicolis and Prigogine 1989], la agregación de las amebas en forma de un plasmodium multicelular que reptá, es disparada por concentraciones de una feromona llamada acrasina por encima de un valor crítico.

Cuando los recursos alimenticios son abundantes, las células viven de forma independiente. Sin embargo, cuando detectan restricciones en los nutrientes, comienzan a liberar acrasina. Si en cierto lugar se produce una densidad de acrasina por encima de cierto valor umbral, debido a la presencia de células emisoras, se produce una atracción irreversible de amebas hacia ese lugar, visible en forma de filamentos y espirales en su movimiento hacia un centro, donde comienza la formación del plasmodium.

Tras su formación, el plasmodium busca un lugar adecuado para instalarse, y allí se fija, cambia de forma y se convierte en una especie de pólipo capaz de producir esporas de nuevas amebas.

Este comportamiento es apropiado, ya que un ser pluricelular, al tener menos superficie expuesta al exterior, tiene menos requerimientos térmicos y nutricionales que sus células por separado.

A diferencia del plasmodium, la mayoría de los seres pluricelulares parecen haber perdido la capacidad de disgregarse o agregarse, y las células de un ser pluricelular en crecimiento permanecen juntas tras dividirse, en lugar de separarse cada una por su propio camino.

Aunque nuestras células parecen haber perdido la mayor parte de los recursos necesarios para vivir solas en mares, suelos o aire, sin embargo en medios apropiados (en laboratorio) son cultivables, denotando esa autonomía esencial de toda protactista. De modo que en cierto sentido podemos decir, como Margulis, que somos «colonias con patas».

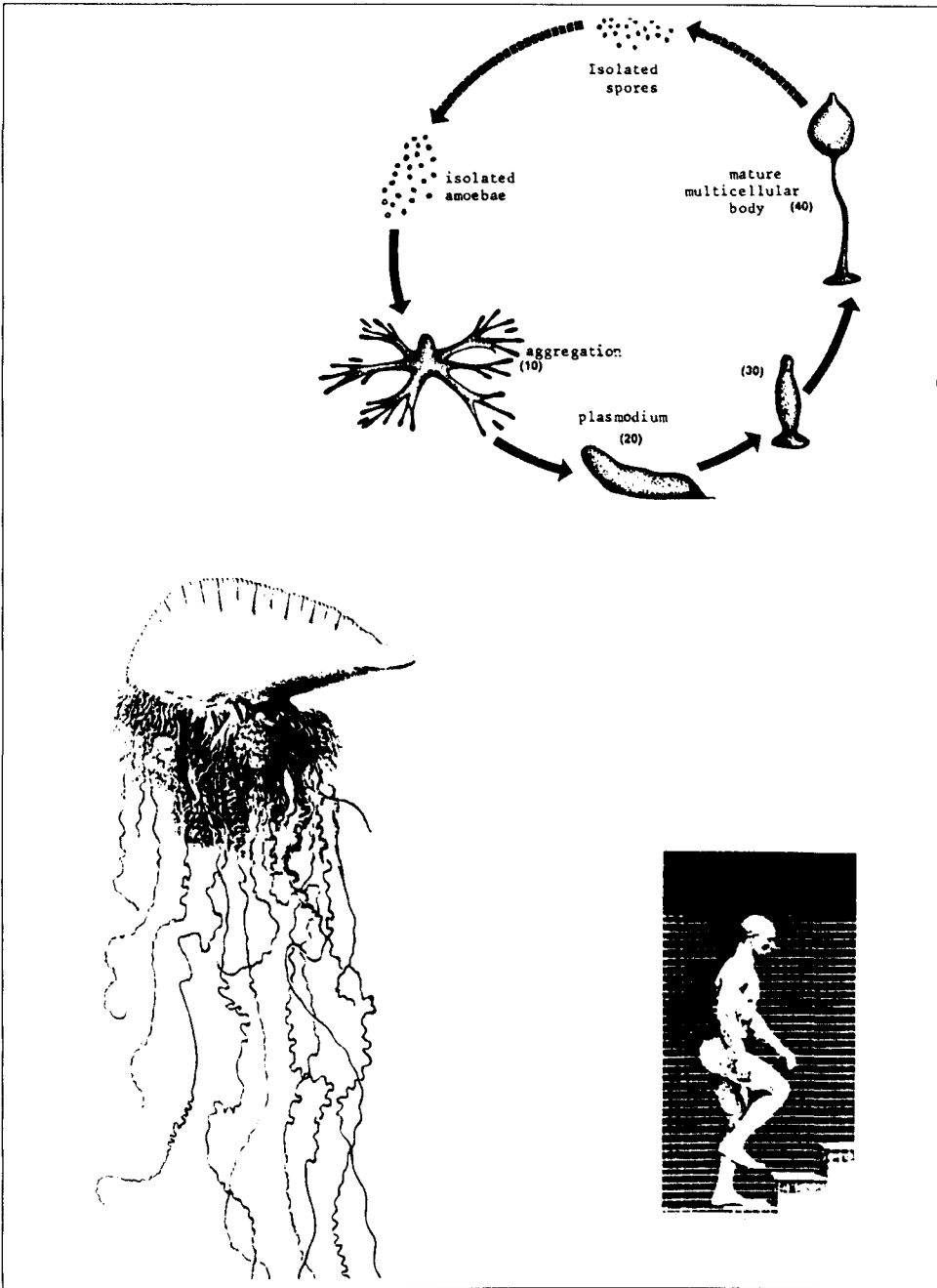


Figura 9. Imágenes correspondientes a: (i) seres vivos capaces de vivir independientemente o como colonia (de Nicolis y Prigogine, 1989, p. 33), (ii) colonias de seres vivos y (iii) seres vivos que no pueden vivir sino como colonias permanentes de células (de una fotografía de E. Muybridge).

5.5. La embriología

Los primeros modelos matemáticos sobre morfogénesis fueron propuestos por Alan Turing en 1952 [Turing 1952], y están siendo actualmente intensamente desarrollados.

Las ideas cualitativas sobre como se constituye un hombre se empiezan a entender, y constituyen un buen punto de partida para ensayar modelos semi-cuantitativos de morfogénesis, en los que las ideas de autoorganización y sinérgica tienen un lugar destacado.

La figura 10 ilustra las principales fases de la morfogénesis de un embrión.

Según Bateson, el punto de entrada del espermatozoide en el óvulo de una rana proporciona la información suficiente para que se produzca un gradiente hormonal en el óvulo, que define cual será el punto de la boca y cuál el del ano.

Un simple pinchazo, basta incluso para disparar el proceso y generar una rana normal, capaz de cazar moscas, saltar, etc, aunque incapaz de reproducirse por carecer de la doble dotación genética necesaria para ello.

Una vez producida la polarización del huevo, por éste u otro mecanismo, la superficie interior del endodermo de la blástula empieza a crecer más rápidamente que su parte exterior, mecanismo universalmente utilizado entre los seres vivos para producir pliegues en sus membranas. Cualquier superficie que se dilate en efecto más rápidamente por una cara que por la otra se comba.

La invaginación continúa hasta que la parte más profunda acabe perforando el fondo del saco. Todo el proceso parece buscar el conseguir la estructura básica de los celomados: la de un largo gusano con dos aberturas: una para la boca y otra para el ano.

El proceso continúa luego mediante una serie de bifurcaciones o catástrofes a medida que las células situadas en distintas posiciones del embrión activan o inhiben secuencialmente la expresión de distintos grupos de genes. Los tiempos y lugares en que el citoplasma de distintas células es animado a activar o inhibir genes debe formar parte de algún proceso autoorganizativo aún poco entendido. Este proceso está siendo investigado por autores como René Thom [Thom 1972], L.V. Belousov [Belousov 1984] y Brian Goodwin [Goodwin 1998].

Tras alcanzar la estructura de celomado, los sentidos se agrupan alrededor de la entrada del largo tubo digestivo, induciendo que los ganglios nerviosos cercanos aumenten de tamaño, hasta convertirse en cerebros.

La serie de bifurcaciones que ilustra la figura inferior de la serie de figuras número 10 acaba de especializar los distintos órganos.

Acompañando a estas bifurcaciones, contribuye igualmente a la producción de la forma orgánica el crecimiento diferencial de las distintas superficies externas e internas, como muestra la serie de figuras número 11, de D'Arcy Thompson [Thompson 1979].

La estructura de celomado parece ir acompañada en el caso de los cordados vertebrados de una segmentación distinta a la de los artrópodos, y de la aparición de bandas musculares cruzadas en la espalda, que ya se observan en nuestro más arcaico antecesor conocido, «Pikaia», el primer cordado [Gould 1991].

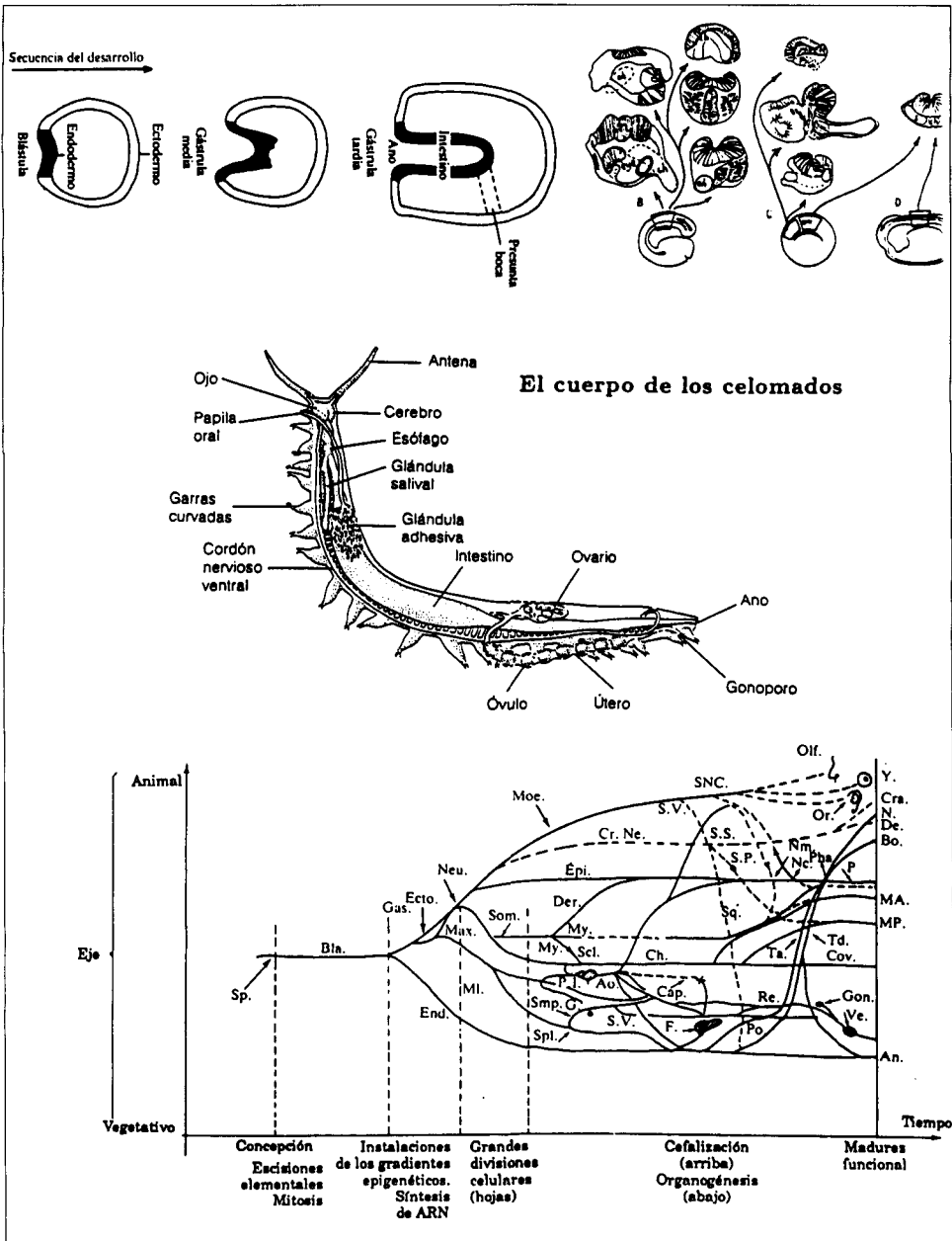


Figura 10. En la parte superior de la lámina se esquematizan los primeros pasos morfogenéticos hacia la formación de un animal como nosotros. Los primeros pasos (de Belousov 1984) tienden a buscar la estructura de celomado (figura central, de Margulis y Schwarz, 1985, p. 223): un largo tubo digestivo en torno a cuya entrada se colocan los *sentidos* principales. Un conjunto ulterior de especializaciones (figura inferior) crean los detalles finales de la forma (de R. Thom 1990, p. 178).

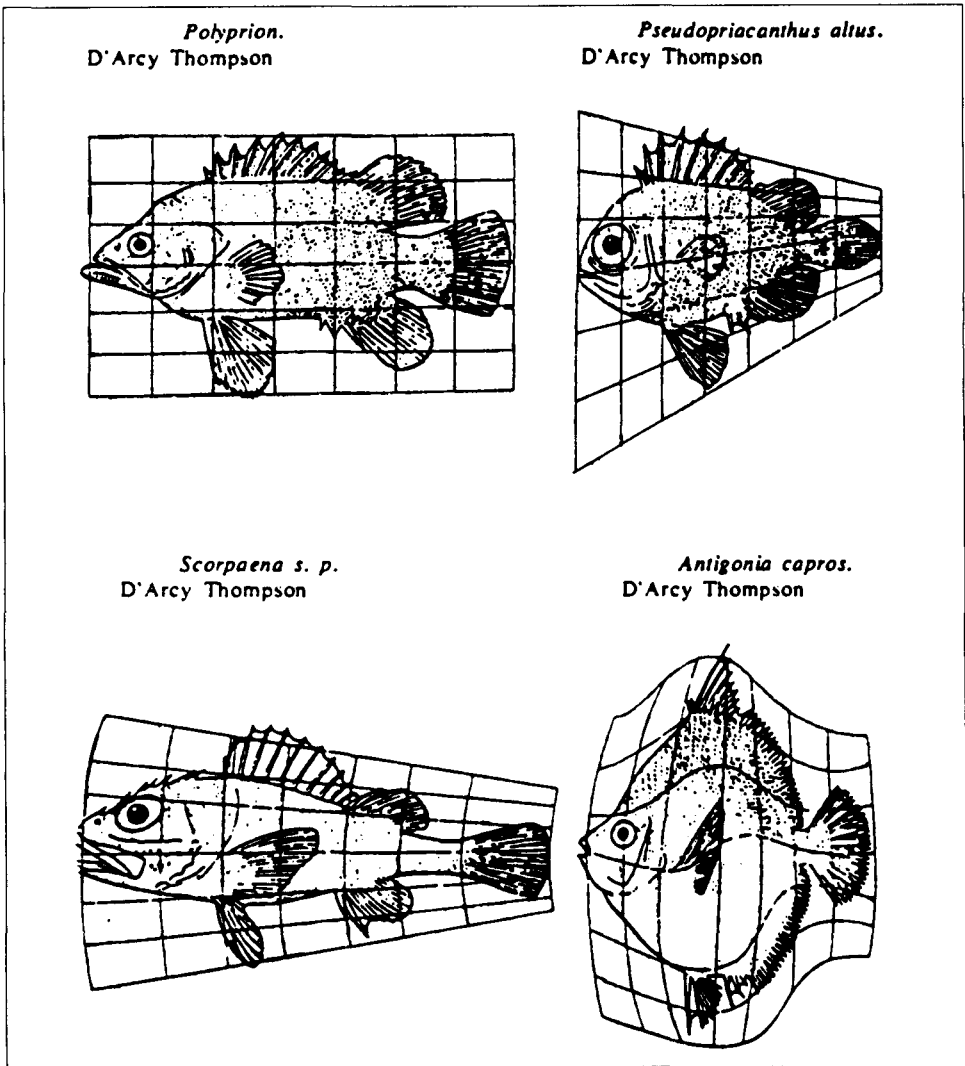


Figura 11. Un mecanismo simple, como el crecimiento diferencial de las distintas regiones de una membrana, genera formas de apariencia muy distinta con sólo variar un poco las tasas de crecimiento diferencial. Estas imágenes de D'arcy Thompson (1979) son muy ilustrativas a este respecto.

5.6. Construcción de realidad por sistemas artificiales y naturales

Una cuestión que se plantean los modelos que tratan de entender la capacidad simbolizadora y cognitiva de los hombres y otros seres vivos, es qué hacen estos sistemas cuando perciben, o cuando dicen reconocer una pauta «externa».

En cualquier caso, aquello que es significativo para las abejas (luces polarizadas y ultravioletas, superficies cargadas, etc) no parece coincidir con lo que es significativo para los seres humanos. Por esto y otras razones, las perspectivas constructivistas (e.g. Lorentz, Riedl) y «enactivista» (Varela), afirman que los seres que conocen «construyen su propia realidad».

Los modelos más simples tratan de simular la producción de realidad suponiendo que en gran parte emerge de un juego de descargas sinápticas entre las neuronas del cerebro de los animales.

La parte inferior de la figura 12 muestra un modelo muy simple de Varela en el que bloques de neuronas son representadas mediante «autómatas celulares» paralelepípicos interconectados mediante reglas muy simples.

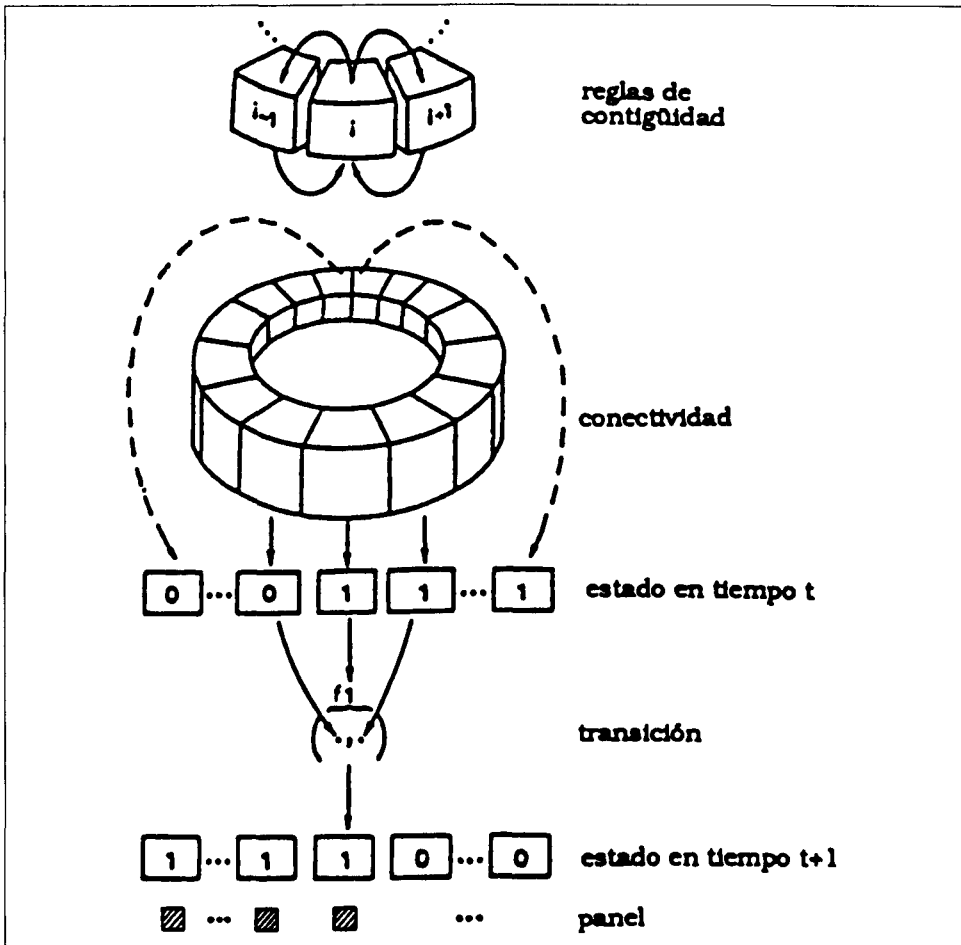


Figura 12. Sistema de autómatas interconectados mediante reglas simples de interacción que cambian de estado según cuáles sean los estados de sus vecinos (véase texto). Este sistema constituye un modelo muy simple de sistema cognitivo (de Varela 1990).

Partiendo de estados iniciales arbitrarios, tales reglas de interacción permite al sistema de autómatas autoorganizarse y crear pautas de respuesta incluso sin necesidad de estimulación exterior, tal como muestran las seis figuras inferiores de la serie número 13.

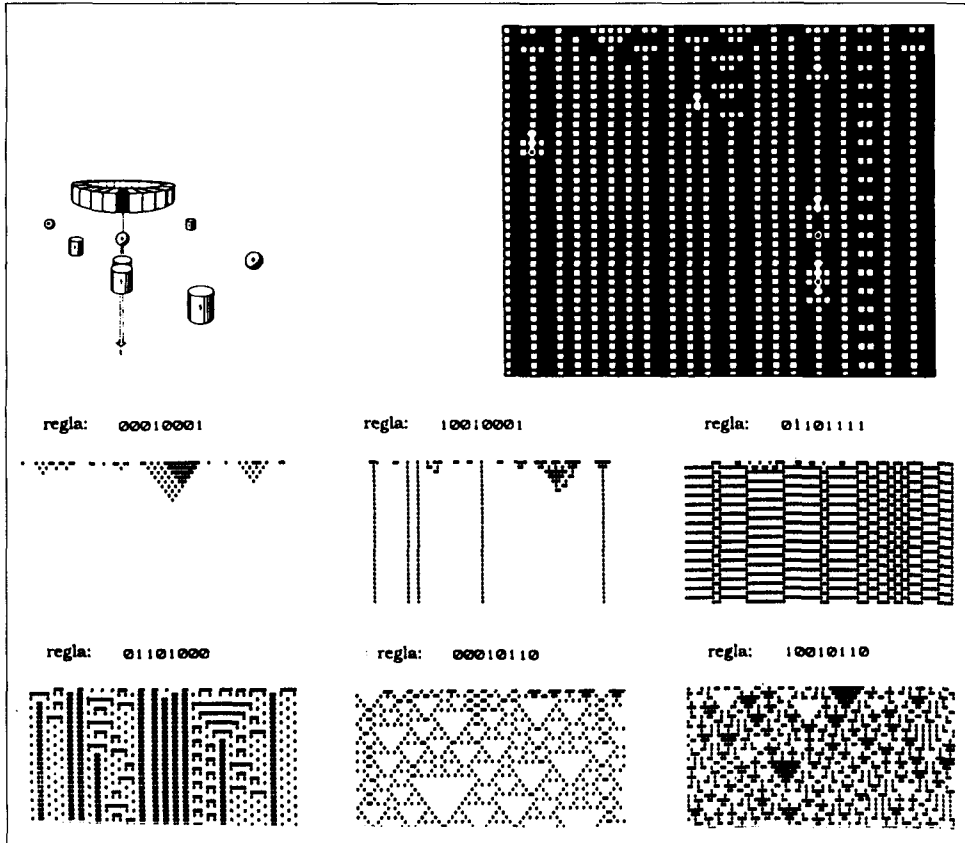


Figura 13. Respuesta «cognitiva» del sistema de la figura anterior en presencia de ruido externo (arriba a la derecha) y en ausencia de ruido externo pero con distintas reglas de interacción, a partir de un mismo estado inicial (6 figuras finales).

Figuras tomadas de Varela, 1990.

Según la regla utilizada, la pauta de respuesta colectiva consiste en: (i) autómatas que tienden a un estado estacionario de inactividad, o (ii) autómatas que tienden a un estado estacionario de encendido permanente, mientras otros se apagan, o (iii) autómatas cuya actividad oscila periódicamente, o (iv) una combinación de autómatas estacionarios con otros cíclicos, y aún otros de comportamiento intermitente, o (v) y (vi) pautas que combinan comportamientos intermitentes con comportamientos aparentemente caóticos.

Cuando a tales sistemas de autómatas se les excita con una señal aleatoria exterior, responden según la regla que estén utilizando. Así, se puede ver en la figura superior derecha de la serie 13 un ejemplo de regla, que provoca que cada vez que el sistema es excitado por dos objetos externos de forma cilíndrica uno al lado del otro, los autómatas con estado estacionario que están aislados se desexcitan mientras que sus vecinos inmediatos se activan, produciéndose una bifurcación del «atractor» local.

Esta clase de comportamiento es para Varela un modelo de cómo un sistema cognitivo real podría crear su propia realidad significativa y relevante a partir de estímulos no necesariamente pre-estructurados del exterior.

La regla interna de interacción sería como un «reto» lanzado al mundo externo con mayor o menor éxito al autoanimar al propio animal, al permitirle mejor o peor el interactuar ordenadamente con su entorno, y en fin, permitiéndole sobrevivir, y ser sensible a la eventual aparición de pautas en su medio.

5.7. Comportamientos sociales en animales

El ensamblaje de cuerpos animales en forma de comunicación y cooperación social es otro tema de gran interés, especialmente por sus posibles implicaciones en la comprensión de las sociedades humanas.

Los comportamientos de exploración y construcción de nidos por abejas, hormigas y termes, que han sido los mejor estudiados, incluyen pautas que pueden ser descritas como procesos de autoorganización.

En la construcción de un nido, por ejemplo, las termes caen sobre un terreno y, al azar, comienzan a depositar feromonas.

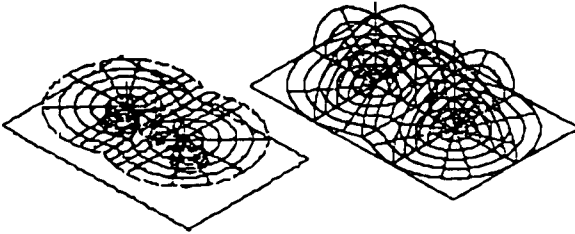
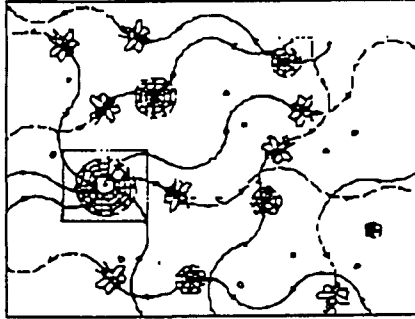
La figura 14 muestra las tres fases de la construcción de un termitero, según Kugler y Shaw [Kugler y Shaw 1990].

La aparición por azar de una concentración de feromona por encima de cierto umbral en ciertos puntos del espacio, atrae a nuevas termitas hacia ese sitio, con lo que la descarga aleatoria de materiales por las termitas comienza a desequilibrarse en favor de esos lugares particulares. Ello provoca sobreacumulación de depósitos sobre esos lugares del terreno, en los cuales comienzan a formarse columnas. Por el mismo mecanismo de atracción olfativa, esas columnas van inclinándose unas hacia las otras, al irse desequilibrando el depósito hacia las direcciones donde el gradiente de olor es mayor, lo cual provoca que las columnas degeneran tarde o temprano en arcos.

Finalmente, y aparentemente por el mismo mecanismo, la parte superior de los arcos sirve de base para que nuevos materiales sean colocados sobre el sistema de arcos hasta el cierre completo de la parte superior del termitero.

Obsérvese que, visto desde fuera, las termes parecen estar buscando un fin trazado a priori; sin embargo, lo único que han estado haciendo todo el tiempo es algo análogo a seguir varias reglas simples: «vague por la superficie, acérquese de vez en cuando a los sitios donde huela más a feromona y suelte su material».

1. The ants emit a quantity α of pheromone per unit of time.
2. H decomposes at a rate proportional to its density: $-\beta H$.
3. Its propagation in the medium obeys Fick's law where D_H is the diffusion coefficient.



Pheromone Diffusion Gradient Surrounding Two Pillars. Because the two pillars act as competing attractors for the termites, a *saddle-point* is created between them. Here we see a 2-D (left) and 3-D field of equipotential curves radiating out from the deposit sites soon to become pillars.

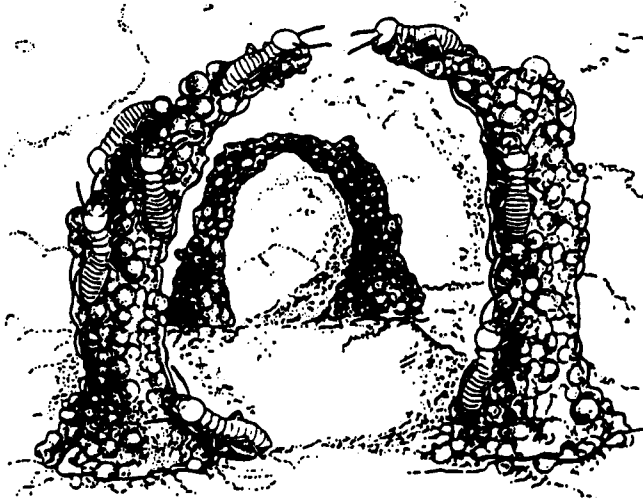


Figura 14. Primeras fases de la construcción de un termitero según Kugler y Shaw, 1990.

Salvando las distancias, esta clase de modelos parecen útiles también como punto de partida para el estudio de algunos fenómenos sociales humanos, donde la acción de muchos individuos produce frecuentemente efectos que nadie había buscado, independientemente de que a posteriori puedan venir bien a algunos grupos sociales o puedan ser racionalizados por otros.

5.8. Comportamiento adaptativo en sistemas sociales

Los modelos de actividad económica inteligente que están desarrollando distintos autores del Instituto de Santa Fe (véase Palmer et al 1994) utilizan muchos de los conceptos asociados al paradigma de la autoorganización y añaden a ellos mecanismos de adaptación y aprendizaje. Estos mecanismos tratan de simular el comportamiento inteligente y tentativo de los sujetos humanos y su co-evolución en un marco en que todos tratan de sobrevivir o mejorar económicamente.

Cada agente inteligente es caracterizado mediante un conjunto de varias decenas de reglas, cada una de las cuales tiene tres partes: (i) Una condición que define cuáles son las condiciones del mercado bajo las cuales la regla está activada, (ii) una acción bivaluada: +1 (compre) o -1 (venda) y (iii) un peso, representando cuán exitosa ha sido la regla en el pasado a la hora de aumentar los beneficios del agente.

Cada vez que un agente tiene que tomar una decisión, lista primero el conjunto de sus reglas que están activadas y tienen un peso positivo y luego selecciona una de ellas aleatoriamente con probabilidad proporcional a su peso.

La parte primera de la regla, la condición, consiste en una palabra tal como $01*011*0*$ construída con el alfabeto $\{0, 1, *\}$. Estas palabras son comparadas con palabras de igual longitud constituídas únicamente por los símbolos 0 y 1, que representan el estado del mercado en el instante dado. Esos símbolos 0 y 1 dan información sobre si se cumplen o no se cumplen determinados rasgos relevantes del mercado, tales como los siguientes: (i) El precio está 1.2 veces sobre el valor esperado (de acuerdo con una determinada fórmula de equilibrio económico), (ii) la media móvil de 20 días del precio está por encima de la media móvil de 100 días, etc.

Los símbolos $*$ son comodines que casan tanto con los símbolos 0 como con los 1. Cuando todos los símbolos de una regla casan con los correspondientes símbolos del estado del mercado, la regla se activa.

Además, las reglas son hechas evolucionar mediante el uso de algoritmos genéticos que reemplazan del 10 al 20 por cien de las reglas, las de menor peso, por otras nuevas. Para ello se toma el 20 por cien de reglas de mayor peso aleatoriamente y con probabilidad proporcional a su peso, y se someten a alguno de estos procesos: (i) *Mutación*: unos pocos de sus símbolos son alterados aleatoriamente, manteniendo constante el número de símbolos $*$ (símbolos indiferentes al rasgo); (ii) *Cruzamiento*: Se toman dos palabras padres y se trocean, combinando luego los trozos para generar dos palabras hijas. La idea es combinar buenos «bloques de construcción» originales en formas nuevas.

Obsérvese cómo esa mutación y ese cruzamiento tratan de imitar los dos conocidos mecanismos a través de los cuales las especies vivas cambian sus códigos genéticos con la cooperación de la selección natural procedente de su entorno.

Los dividendos ofrecidos en cada periodo a cada acción es simulado mediante un proceso estocástico independiente de las acciones de los agentes. En cambio, los precios de las acciones son modelados mediante una ecuación determinista que los relaciona con la oferta y la demanda de acciones en cada momento.

La original combinación de los mecanismos de autoorganización y adaptación propuesta por la escuela de santa Fe ha sido capaz de simular comportamientos cualitativamente muy realistas en sistemas sociales sometidos a las reglas de mercado. En particular:

— Reproduce equilibrio económico y comportamiento *racional* cuando el número de agentes, de reglas y la complejidad de los dividendos es baja.

— Reproduce comportamiento de no equilibrio en situaciones más complejas, incluyendo crisis y subidas continuas de apariencia caótica.

— La diversidad de las reglas usadas por los agentes crece con el tiempo. La complejidad de los agentes (número de símbolos no *) también crece con el tiempo, aun cuando los fenómenos de mercado se mantienen relativamente estacionarios. Ello sugiere el descubrimiento de matizaciones y excepciones que van siendo añadidas a reglas más crudas descubiertas con anterioridad.

— Las reglas necesarias para triunfar van cambiando con el tiempo, no existiendo una estrategia estacionaria óptima predefinida.

— El sistema se adapta espontáneamente a su entorno, por ejemplo, ante un cambio abrupto en la cartera de acciones disponible o en los dividendos ofrecidos.

Los agentes no se quedan bloqueados casi en ningún caso, pues combinan el uso de reglas de éxito probado con la exploración de tentativas novedosas.

— Una distribución inicialmente homogénea de riqueza se inestabiliza y crea pronto una distribución más amplia, con algunos agentes volviéndose mucho más ricos que otros durante largos periodos. Ello refleja la heterogeneidad de los agentes y su *suerte* a la hora de descubrir buenas reglas y aplicarlas en los momentos oportunos. Sin embargo, en periodos muy largos, la identidad de los ganadores y perdedores cambia, aunque su distribución estadística permanece aproximadamente constante.

6. CONCLUSIONES

Una serie de conceptos y modelos en uso en la simulación de procesos de cambio estructural en física, biología y economía permiten abordar por primera vez procesos de aumento de la complejidad en sistemas muy diversos.

Los conceptos y mecanismos más utilizados para describir tales procesos de una forma que empieza a ser realista son: (i) la autoorganización por generación de atractores en sistemas disipativos, (ii) la inestabilidad del sistema autoorganizativo ante cambios en los parámetros ambientales, (iii) la inestabilidad

estructural del sistema autoorganizativo ante nuevas interacciones, (iv) el ensamblaje *quimérico* de sistemas autoorganizativos en la forma de sistemas que se automantienen y (v) la coevolución adaptativa de las reglas de interacción utilizadas por los sistemas agentes en presencia de otros sistemas agentes.

Muchos de estos conceptos y modelos aparentan ser de enorme potencial en ciencias sociales, donde el problema de la complejidad aparece en todos los niveles de análisis y en casi cualquier aplicación práctica.

Una conclusión general que cabe extraer de los estudios realizados dentro de los programas de investigación comentados es que hay propiedades y leyes metaestables emergentes en cada nivel de autoorganización, y de su juego de encuentros surgen niveles de organización nuevos.

Estas propiedades, propias de cada nivel, han surgido de interacciones autocatalíticas entre propiedades inferiores, esto es, interacciones que se amplifican mutuamente. Esta clase de interacciones tienen una propiedad matemática llamada «no-linealidad». Cuando actúa la no-linealidad, puede generar comportamientos emergentes en unos casos estacionarios, en otros casos periódicos (como en los ciclos biológicos) y en otros casos caóticos. La clase de comportamiento emergente dependerá de lo compleja que sea no-linealidad (la autocatálisis entre los componentes) y del ambiente del sistema.

Para algunos autores, las emergencias de tipo caótico proporcionan un mecanismo que posibilitaría el «libre albedrío» a pesar de la aparente existencia de una dinámica macroscópica casi determinista en el sistema nervioso. Así, la creatividad, podría tener en su base un proceso caótico que amplificara selectivamente pequeñas fluctuaciones y las modelara en forma de estados mentalmente coherentes, que experimentaríamos como pensamientos.

El paradigma de los sistemas autoorganizativos puede aplicarse no sólo a entidades materiales («Mundo-I» de Popper) sino también a entidades mentales («Mundo-II») y a entidades abstractas que trascienden las experiencias mentales individuales («Mundo-III») tales como las culturas, las instituciones, las teorías científicas, el arte o la religión.

Cuando se aplica a estos últimos campos, el paradigma se vuelve radicalmente simétrico con respecto a los constructos abstractos de los que habla. Pues él mismo, como teoría científica, sería el producto de alguna clase de proceso autoorganizativo social y cultural. Ello es paradójico sólo si mantenemos dos prejuicios: (i) el de que la ciencia está por encima de sus objetos y (ii) el de que la ciencia es una representación de *cosas en sí* de existencia independiente. Sin embargo, el paradigma de los sistemas autoorganizativos nunca ha pretendido eso, al menos en su formulación por Prigogine. Lo único que ha pretendido es proponer modelos (metáforas) útiles de procesos observables. Y un proceso observable es una relación entre los observadores humanos y su mundo de entes.

En este contexto, tiene sentido la afirmación radicalmente anti-reduccionista de Paul Davis de que «jamás entenderemos completamente los procesos de más bajo nivel hasta que entendamos también las leyes de nivel más alto», o sea, las del observador.

Una discusión interesante, puesta en el candelero por las propuestas teóricas de Niklas Luhmann, es la de si la sociedad es un sistema autorreferente que se

automantiene (esto es, un sistema autopoietico) o no. No voy a entrar aquí en la particular definición que hace Luhmann de la sociedad. Sin embargo, bajo la acepción usual de conjunto de instituciones, la sociedad no tendría por que ser un sistema de estas características particulares, que son en cambio apropiadas a objetos como la célula o incluso un organismo pluricelular.

En efecto, la sociedad es un conjunto de formas emergentes complejas (las *instituciones*), producto de la acción social, es decir, producto de la coordinación intencional de interacciones grupales e individuales. La institución emergente facilita y promueve las coordinaciones que han sido capaces de generarla a ella misma. Según Hejl, una sociedad así entendida no es un sistema auto-referente que se automantiene. En mi opinión no lo es, pero se le parece mucho.

Según Hejl no lo es, porque si las instituciones no proporcionan a los individuos los alimentos que ellos precisan para su metabolismo ellos son capaces de tomarlo directamente de la naturaleza. Esta capacidad latente es atestiguada en efecto por los casos de *niños lobo* históricos y otros casos de supervivencia forzada en la naturaleza. El Hombre mantiene aún una autonomía biológica individual mucho mayor que las células de un organismo dentro de un cuerpo.

Este argumento es sin embargo discutible, pues no crea una demarcación clara. Las células, como vimos, no han perdido del todo la autonomía. La autonomía es una cuestión de grado más que de sí o no. Luego se puede decir que la mayoría de los agentes humanos se dejan mantener en gran medida por otros hombres a través de instituciones sociales, aunque podrían no hacerlo en una medida mucho mayor que una célula. Por tanto, la sociedad se parece de facto la mayor parte del tiempo y en casi todos sitios a un sistema que se automantiene, aunque puede dejar de serlo en cualquier momento y lugar.

Según Hejl, tampoco se puede hablar de auto-referencia en una sociedad, porque el sistema no mantiene un control muy estricto sobre las creencias y estados de sus componentes. Pero de nuevo el argumento es débil, debido a que la autorreferencia de que disfruta un cerebro (o un citoplasma) tampoco parece establecer controles estrictos sobre los estados de las neuronas (enzimas individuales) sino que únicamente establece una *correlación* entre los cambios de estado de unas y otras componentes, lo mismo que hace el habla humana. Lo particular de la sociedad es que además de ser auto-referencial hasta cierto punto, las señales novedosas y ambiguas son abundantísimas y generan continuamente efectos inesperados en lugares inesperados.

En conclusión, cabría decir que, aunque el modelo del sistema auto-referencial que se automantiene puede ser útil para algunos rasgos de la sociedad real, la sociedad es más compleja en procesos y posibilidades de comportamiento de lo que ese modelo sugiere.

En este trabajo hemos esbozado los principales conceptos de interés en posibles aplicaciones a la descripción y comprensión de los procesos sociales. En una publicación complementaria [García-Olivares 1999] estudiaremos en detalle los principales métodos, instrumentos y modelos matemáticos que los programas de investigación citados en este artículo están hoy en disposición de ofrecer a la metodología de las ciencias sociales.

7. REFERENCIAS

- ANDERSON, D. A. & SOBIESKI, R. J. (1980): *Introduction to Microbiology*, C. V. Mosby Company.
- BELOUSOV, L. V., (1984): «Synergetics and Biological Morphogenesis» en Krinsky, V.I. (ed.), *Self-Organization and Autowaves*, Springer, p. 204-208.
- DE DUVE, C., (1988): *La célula viva*, Ed. Labor, Barcelona.
- EIGEN, M. and SCHUSTER, P. (1979): *The hypercycle*. Springer, Berlin.
- GARCÍA-OLIVARES (1999): «Modelos evolutivos complejos en ciencias sociales», a la espera de ser publicado en Revista *Empiria*.
- GLANDSDORF y PRIGOGINE (1971): *Structure, Stabilité et Fluctuations*, Masson et C^{ie} Editeurs, Paris.
- GOODWIN, Brian (1998): *Las manchas del leopardo. La evolución de la complejidad*, Tusquets Editores, Barcelona.
- GOULD, S. J. (1991): *La vida maravillosa*, Ed. Crítica.
- HAKEN, H. (1977): *Synergetics, An introduction*, Springer.
- HAKEN, H. (1983): *Advanced Synergetics*, Springer.
- KUGLER y SHAW (1990): «Symmetry and Symmetry-Breaking in Thermodynamic and Epistemic Engines: A Coupling of First and Second Laws», en H. Haken (ed.), *Synergetics of cognition*, Springer, pp. 296-331.
- MARGULIS, L. y SCHWARZ, K. V. (1985), *Cinco Reinos*. Ed. Labor.
- MAYNARD-SMITH, J. (1988): *Mathematical Ecology*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K..
- MORIN, E. (1986): *El método I: La naturaleza de la naturaleza*, Cátedra.
- NICOLIS, G. y PRIGOGINE, I. (1977): *Self-Organization in Non-equilibrium Systems*, Wiley.
- NICOLIS, G. y PRIGOGINE, I. (1989): *Exploring Complexity*, Freeman and Co..
- PALMER, R. G., ARTHUR, W. Brian, HOLLAND, John H., LEBARON, Blake and TAYLER, Paul (1994): «Artificial economic life: a simple model of a stockmarket». *Physica D* 75, p. 264-274.
- PRIGOGINE, I. (1972): *¿Tan sólo una ilusión?*, Tusquets editores.
- PRIGOGINE, I. y STENGERS, I. (1979): *La Nouvelle Alliance*, Gallimard.
- REEVES, H. (1987): *La hora de embriagarse*. Ed. Kairós.
- SMOES, M. L. (1980): «Chemical Waves in the Oscillatory Zhabotinskii System. A Transition from Temporal to Spatio-temporal Organization», en H. Haken (ed.): *Dynamics of Synergetic Systems*, Springer, Berlin, pp. 80-96.
- THOM, R. (1972): *Stabilité structurelle et morphogénèse*. Benjamin, Reading, Massachusetts.
- THOM, R. (1990): *Esbozo de una Semiología*. Gedisa.
- THOMPSON, D. (1979): *On growth and form*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K..
- TURING, A. (1952): *Phil. Trans. Roy. Soc.* B237, 37.
- VARELA, F. (1990): *Conocer*. Gedisa. Barcelona.
- VARELA, F., MATURANA, H. R. and URIBE, R. (1974): «Autopoiesis: The Organization of Living Systems, Its Characterization and a Model», *Bio-Systems*, 5, 187-196.
- VON FOERSTER, Heinz (1984): *Observing Systems*, Intersystem Publications, Seaside, California, USA.
- ZHABOTINSKI, A. (1964): *Biofizika* 9, 306.
- ZELNY, M. and PIERRE, N. A. (1976): «Simulation of Self-Renewing Systems», en E. Jantsch and C.H. Waddington (eds.), *Evolution and consciousness - Human systems in transition*, Addison - Wesley Publish. Co.

RESUMEN

En este trabajo describimos los principales conceptos y *modelos* (ejemplos de descripción matemática) que están siendo utilizados en los últimos años para la descripción de la evolución de la complejidad en procesos físicos, biológicos y sociales. Muchos de estos conceptos y modelos pueden ser de gran utilidad como puntos de arranque metodológicos en la descripción de algunos de los rasgos que caracterizan a muchos procesos de constitución y evolución social. Ello es particularmente interesante debido a que los procesos sociales incluyen complejidades específicas irreducibles y poco entendidas tales como la generación y uso colectivo de significados.

ABSTRACT

In this paper we describe the main concepts and models (examples of mathematical description) that are being used in the last years to describe the complexity evolution in physical, biological and social processes. Many of these concepts and models can be notably usefull as methodological starting points in the description of some features characterizing many processes of social constitution and evolution. It is particularly relevant since social processes include specific and irreducible complexities which are poorly understood, such as the generation and collective utilization of meanings.