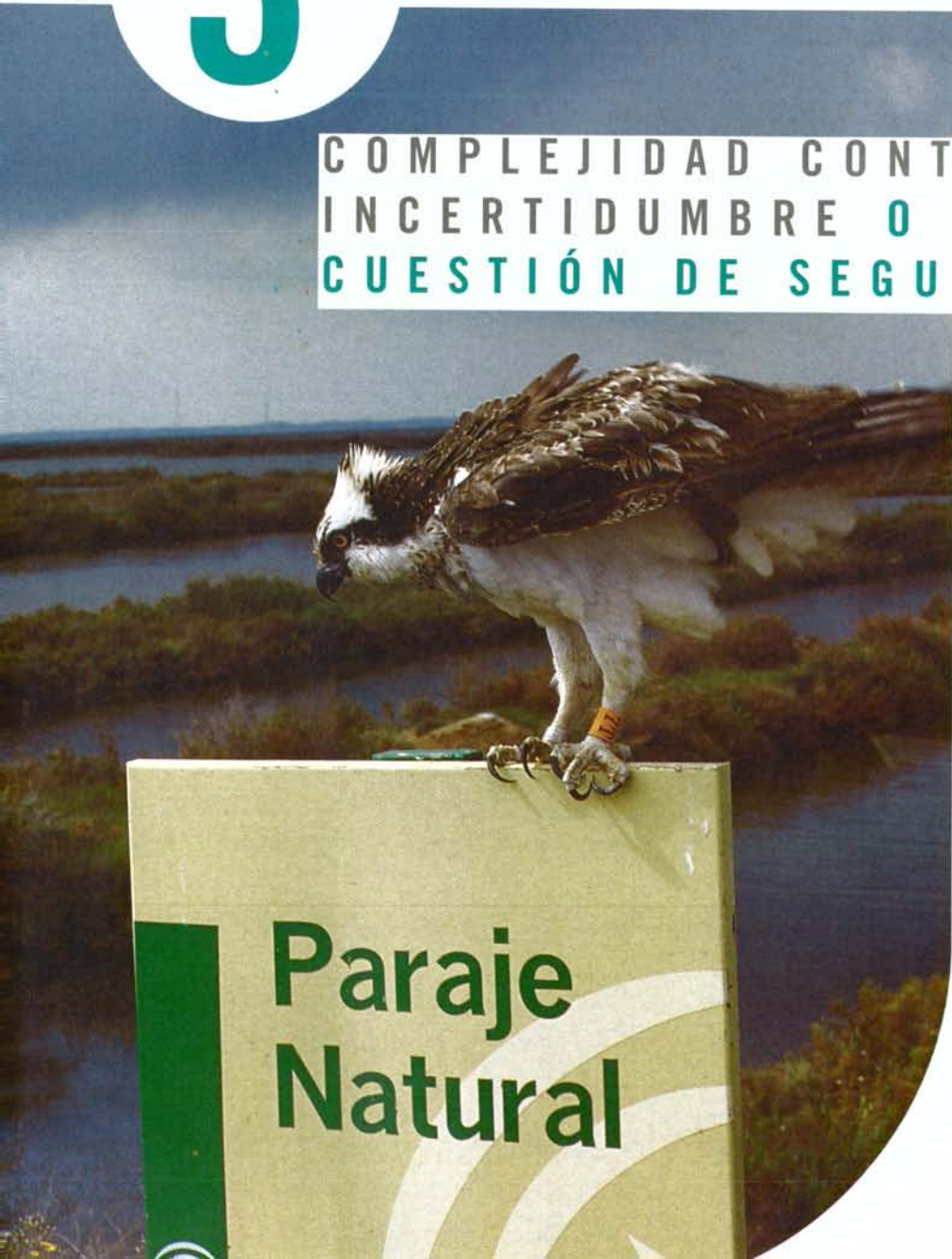


3

COMPLEJIDAD CONTRA
INCERTIDUMBRE O LA
CUESTIÓN DE SEGUIR VIVO



COMPLEJIDAD CONTRA INCERTIDUMBRE O LA CUESTIÓN DE SEGUIR VIVO

JORGE WAGENSBERG

DIRECTOR DEL MUSEO DE LAS CIENCIAS
DE BARCELONA

Las funciones naturales proceden de la selección natural. La selección natural actúa sobre individuos vivos. Y los individuos vivos son los que exhiben una parte importante de las formas que queremos comprender. Las formas emergen y se consagran según unas alternativas compatibles con unas reglas (o limitaciones), las que rigen, si algo así existe, el desarrollo y la evolución de los individuos vivos. Reagrupemos fuerzas acordando algunas definiciones imprescindibles para los apartados que siguen.

Un individuo vivo es una parte del mundo que tiende a mantener una identidad independiente de la incertidumbre de su entorno

Hay tres claves en esta definición. La primera es que el sujeto de la definición es un *individuo* vivo y no una parte o una simple colección de individuos. Ello no descarta, claro, que la asociación de dos o más individuos puedan llegar a dar lugar a un nuevo individuo vivo. Como veremos, crear una nueva identidad, aunque sea en otro orden jerárquico es, de hecho, un buen recurso para perpetuar la calidad de *vivo*. La segunda clave está en que la relación del individuo con su entorno no se define con la idea de adaptación sino que se usa la idea de *independencia*, un término que tiene un nítido significado a la hora de hablar de la estabilidad de un sistema y de sus eventuales interacciones con su mundo exterior. Un pedazo de materia inerte, por ejemplo, se calienta mansamente cuando en su entorno inmediato aumenta la temperatura. Se adapta. Un ser vivo, en cambio, tiende a reorganizarse para que su temperatura se mantenga como si en el entorno no hubiera ocurrido

nada. Cambia para que nada cambie. La clave *independencia* proporciona a la clave *individuo* su verdadero sentido. Pero la tercera es la clave de las claves: consiste en elegir la *incertidumbre* como el aspecto relevante del entorno (y no tanto el entorno en sí mismo). Lo trascendente no es atender y responder a unas fluctuaciones concretas y determinadas del entorno, sino tener la capacidad para encajar las fluctuaciones de un entorno en principio caprichoso e imprevisible. Resulta fácil inventar una máquina que anule los efectos de unas perturbaciones conocidas de antemano y muy difícil construir una máquina que se defienda de la incertidumbre. Con esta definición ganan sentido algunos conceptos que habían quedado desprestigiados en biología. Por ejemplo, la palabra progreso. De la definición que acabamos de proponer para un ser vivo surge naturalmente la siguiente idea de progreso:

Un individuo progresa en un entorno si gana independencia con respecto a él.

Se trata por cierto de un concepto nuevo que salva las contradicciones y ambigüedades causantes de su desprestigio como magnitud científica y que aporta un nuevo punto de enfoque para la gran cuestión de la evolución de las formas vivas: conocer las alternativas que le quedan a un individuo vivo cuando resulta que la incertidumbre de su entorno aumenta. Y para hacerse un panorama de estas alternativas tenemos una ley general representada por la siguiente identidad, una identidad que llamaremos identidad fundamental y que procede de un especial engarce entre la termodinámica del no equilibrio (intercambio de materia y energía del individuo con el entorno) y de

la teoría matemática de la información (intercambio de información con el entorno).

La complejidad de un individuo más su capacidad de anticipación respecto del entorno, es igual a la incertidumbre del entorno más la capacidad del individuo para cambiar el (o de) entorno

La **complejidad** mide la variabilidad de estados accesibles al individuo vivo. Es una expresión de su identidad. Si por ejemplo hablamos de la propiedad color, el término será casi nulo para un oso polar (cien por cien de un sólo color), ligeramente mayor para una cebra (blanco y negro en torno al cincuenta por ciento) y mucho más grande para un ecosistema como el arrecife de coral.

La **incertidumbre** es la complejidad del entorno. Expresa la variabilidad de estados accesibles al entorno. Si seguimos hablando de la propiedad color, el término será casi nulo para un paisaje ártico y enorme para un jardín botánico en flor. Si hablamos de estados atmosféricos posibles, entonces será mayor la de una selva tropical que la del fondo de una fosa marina donde la luz ambiental no existe y donde la temperatura apenas cambia unas décimas a lo largo del año. Es un término imprescindible a la hora de halar de un ser vivo y da cuenta directamente de la caprichosidad de las fluctuaciones ambientales.

La **capacidad de anticipación** de un ser vivo expresa la variabilidad de los estados accesibles (o complejidad) de un individuo vivo, una vez fijados (conocidos) los estados accesibles al entorno. La de una lombriz, capaz de detectar tan sólo ciertos cambios groseros de humedad o de luz ambiental, será muy pequeña. La de una torre de control de un aeropuerto en cambio, será muy grande. El sistema inmunológico, la inteligencia y el propio conocimiento científico son claras soluciones de la evolución para ganar anticipación respecto al entorno.

La **capacidad de cambiar el (o de) entorno** expresa la variabilidad de estados accesibles del entorno, una vez fijados (conocidos) los estados accesibles del individuo. Puede tener el sentido directo de *impacto ambiental*, muy pequeño en el caso de un inmenso desierto transitado por un solitario beduino o muy grande si se trata de la afluencia masiva de bañistas a una pequeña playa. Pero también puede expresar la tecnología (cambiar el entorno) o la movilidad (cambiar de entorno).

Matemáticamente la identidad fundamental es una identidad propiamente dicha. Una ecuación sólo se cumple para unos valores de las variables que llamamos soluciones. En cambio una identidad se cumple para todo valor de las variables. Es inviolable e insoslayable. Si resulta que la incertidumbre del entorno de un individuo aumenta, entonces, para seguir vivo (la ilusión de todo ser vivo), es decir, para mantener la complejidad

propia de su identidad, sólo le queda mejorar su anticipación, su movilidad y/o su tecnología.

La selección natural en este esquema conceptual adquiere nuevo significado y vigor para la discusión de la emergencia de las formas vivas y de hace, en parte, la circularidad con la que a veces se expresa la brillante idea de Darwin.

La selección natural es un filtro que deja pasar todo aquello que favorece la independencia del individuo respecto de la incertidumbre de su entorno

He aquí otra interesante manera de mentar una función natural: ¡una ganancia que permite ganar independencia!

Replanteemos la cuestión de la evolución y sobrevivemos, aunque sea rápidamente, las alternativas que frente sí tiene un ser vivo cuando la incertidumbre aumenta. Existen tres grandes familias de soluciones para seguir vivo. Las **llamaremos independencia pasiva, independencia activa y nueva independencia**.

■ INDEPENDENCIA PASIVA

La manera trivial de ser independiente consiste en aislarse. Si no se intercambia nada con el exterior (materia, energía o información), el exterior no influye en el interior, y viceversa. Sólo que para un ser vivo, tal cosa en principio no es demasiado interesante, porque el único estado termodinámico compatible con el aislamiento es el equilibrio termodinámico, el estado donde ya ha ocurrido todo lo que podía ocurrir, es decir, biológicamente hablando: la muerte. Sin embargo la vida aprovecha aproximaciones de riesgo cerca del estado que la niega.

Un caso es la independencia pasiva por **simplificación**. Consiste en reducir la actividad interior casi a cero. En condiciones muy especiales de baja complejidad, tal cosa puede ser soportable. Es el caso de **sistemas** provisionalmente lo bastante simples como las semillas, esporas u y otras formas resistentes, que pueden esperar inactivos la llegada de tiempos mejores. También es el caso de sistemas no tan simples, pero que renuncian a buena parte de su **actividad** a la espera de una mejora de las condiciones del entorno, como la hibernación, la latencia o el letargo ...

El segundo caso es la independencia pasiva por **aislamiento**. Aquí, al anularse el intercambio, la identidad del sistema queda a merced de su propia actividad interna lo que, al menos parcialmente, puede no ser nada grave. Es **el abrigo**, una manera eficaz de protegerse de ciertas fluctuaciones ambientales más bien previsibles (el pelo invernal, la protección de un nido, de un caparazón blindado,...) La otra manera de minimizar el efecto del intercambio con el exterior es reducir su efecto local, es decir, en lugar de anular su valor absoluto

se reduce su valor relativo a la unidad de masa. Es **la inercia**; una manera eficaz de amortiguar las fluctuaciones del exterior, si el aislamiento es difícil, consiste sencillamente en aumentar el **tamaño**, crecer y ser grande (respecto de las fluctuaciones de temperatura: un vaso de agua o un ratón sufren más la fluctuación de un grado de temperatura que un lago o un caballo y éstos a su vez más que un mar o una ballena; respecto de fluctuaciones del peligro a ser devorado: una ballena depende menos de la incertidumbre del entorno de depredadores que un caballo y éste menos que un ratón). Y, atención, otra manera consiste en alterar la **forma** de la frontera del individuo con el exterior, en particular reducir la relación volumen-superficie (cuando un pájaro extiende sus alas al sol aumenta dicho parámetro para conseguir lo contrario, aprovechar las fluctuaciones exteriores). Si de lo que se trata es de no perder materiales, calor u otra forma de energía, lo más eficaz es adoptar la forma que suponga la mínima superficie posible. Es la esfera, el concepto contrario al concepto de radiador de calefacción (en temas de calor) o al concepto toalla (en temas de llevarse el agua). El instinto universal de un animal que tiene frío es acurrucarse, donde acurrucarse significa acercarse todo lo posible a la forma de una esfera, la forma que más tiempo retiene el calor interior.

■ INDEPENDENCIA ACTIVA

Una manera no trivial de ser independiente consiste en cambiar todo lo que haya que cambiar de la actividad interna y del intercambio con el exterior para conservar la complejidad de la propia identidad. Representa la vida propiamente dicha de los organismos y requiere un genuino concepto de autoorganización, es decir percibir las fluctuaciones y actuar en consecuencia. El intercambio de materia, energía e información mantiene al sistema lejos del equilibrio termodinámico. Ahora es la identidad fundamental la que nos orienta sobre las alternativas para seguir vivo. Se trata de mantener la complejidad cuando aumenta la incertidumbre.

Un camino consiste en intentar aumentar la capacidad de anticipación. Cuanto mayor sea esta facultad más independiente será de la incertidumbre del entorno. Una rata está mejor preparada para amortiguar los caprichos del entorno que una lombriz de tierra. El comportamiento críptico es un modo de independizarse de posibles depredadores y está claro que tal cosa se consigue con una buena información fluyendo entre el individuo y sus alrededores. El sistema nervioso, los órganos de la percepción, el cerebro y las prestaciones de éste, como los distintos grados de inteligencia, siguen ciertas líneas evolutivas que no se explican tanto en virtud de una secuencia de selecciones naturales a favor de la adaptación al medio, sino a favor de una protección contra su incertidumbre. A esta idea se podría objetar ¡y se objeta! que no ocurre lo mismo con muchas otras líneas evolutivas, que hay formas estancadas, incluso regresivas. Es verdad, pero la presunta objeción

encaja también en nuestro esquema conceptual, porque tales casos ocurren en entornos en los que la incertidumbre disminuye. Y en esas condiciones surge el especialista que a veces, a cambio de eficacia o bajo costo, regresa y aumenta su riesgo de ser sorprendido por un capricho de la incertidumbre. No sólo no es un contraejemplo, sino que supone un test suplementario de consistencia del esquema que proponemos. Es lo que ocurre en las profundidades abisales de los océanos, donde la temperatura apenas fluctúa, donde la luz es constantemente nula (reino vegetal ausente) y donde todo lo que tiene algún interés viene de arriba, "cae del cielo", de las capas superiores. La incertidumbre del entorno es casi nula y sus habitantes pueden instalarse y especializarse en cualquier estrategia compatible. Es lo que ocurre en un bosque sin depredadores con abundancia de un alimento que pocos apetecen, como el eucalipto. La especialización tiene algunas ventajas respecto del intercambio de materia y energía, sobre todo de costo y eficacia. No hay que ir rápido, no hay que competir, no hay que buscar, no hay que proteger, ... no hay que anticipar. Pero atención, el especialista es sumamente frágil respecto de un entorno poco incierto, cuando ¡ay! éste deja de serlo. De la capacidad de anticipación dependen funciones tales como el sistema inmunitario y la inteligencia.

El otro camino tiene dos vertientes, pues consiste en (uno) mejorar su capacidad para cambiar el entorno (tecnología) o en (dos) mejorar de entorno (movilidad). Las herramientas, el dominio del fuego, la agricultura o la ganadería son logros tecnológicos que contribuyen a seguir vivo al ganar independencia. El fuego, por ejemplo, aumentó la diversidad de la dieta en una proporción enorme e independiza de las tres o cuatro cosas tiernas y digeribles accesibles en un momento y lugar. Lo mismo puede decirse de una economía basada en el dinero respecto de una economía basada en el trueque. Con el dinero no dependemos de los caprichos del cazador o del recolector para subsistir. El **abrigo**, que antes hemos comentado en su versión pasiva se convierte aquí en genuina **arquitectura** de nidos, madrigueras y toda clase de impensables refugios y construcciones. La otra vertiente de esta posibilidad es nada menos la capacidad de un individuo para moverse dentro de su entorno. Cualquier prestación del movimiento puede jugar decisivamente a favor de la independencia del individuo respecto de la incertidumbre. Es curioso notar, por ejemplo, como el comportamiento críptico se puede lograr de maneras que encajan perfectamente aquí. Una es disfrazándose hasta hacerse indistinguible del paisaje inmediato (como hace un camaleón y tantísimas otras especies), pero cuando no se tiene capacidad alguna de disfraz todavía queda la posibilidad de actuar a la inversa, buscar una parte del paisaje que se parezca al individuo y **escondarse** en él (como hacen tantísimas otras especies). El anterior ejemplo de la aleta para nadar de peces, mamíferos y pájaros sirve también, pero como ilustración de la larga carrera de la movilidad.

Es curioso constatar que las funciones que favorecen la independencia de los individuos vivos de la in-

certidumbre de ciertos entornos pueden llegar a contradecirse entre sí. La inercia por tamaño, la defensa y la movilidad, por ejemplo, llegan con frecuencia a una situación de aparente dilema. Moverse con agilidad en según que paisajes requiere no ocupar demasiado espacio, así que el crecimiento puede llegar a dificultar la movilidad (como ocurre con la cornamenta de tantos herbívoros). En estos casos la solución es de compromiso, donde el compromiso es una nueva función-pacto que hace viables otras dos en conflicto. La nueva función que hace que crecer y moverse se reconcilien finalmente puede ser por ejemplo el **empaquetamiento**. Y no hay inconveniente en adelantar que la emergencia de una forma viva puede conseguirlo: la espiral.

■ INDEPENDENCIA NUEVA

Otra manera no trivial de independizarse cuando la incertidumbre aumenta consiste en renunciar a la propia identidad y seguir vivo con otra (¿más independiente?). Ya hemos comentado que con la selección natural la solución precede al problema así que, hablando correctamente, digamos que un cambio de identidad, cualquiera que sea la causa, puede ser una solución cuando el capricho de la incertidumbre se presenta.

La reproducción y la asociación son prestigiosos procedimientos para crear identidades nuevas. Cualquiera error de replicación es una innovación que se propaga con la reproducción, pero sobre todo con la reproducción sexual, un verdadero generador de variabilidad por combinación de las identidades de individuos diferentes. La nueva identidad puede ser más o menos independiente de la incertidumbre del entorno. Pero está claro que si lo es más, tendrá más cartas para afrontar la nueva compatibilidad con el entorno. El descarte de innovaciones (cambios inviable) aumenta con la incertidumbre reinante. Las que quedan pueden suponer un aumento de la independencia o, de momento, simplemente “quedarse ahí”. Quedarse ahí hasta que la propia selección las elimine o hasta que, en otro estado del entorno, la innovación sí suponga una ventaja en el sentido de una ganancia de independencia. Con el tiempo, las innovaciones seleccionadas se acumulan. Una incertidumbre baja o constante no tiene por qué animar una línea en algún sentido progresiva de innovaciones. Resulta que todos los entornos no tienen la misma incertidumbre. Resulta que la incertidumbre de un entorno no tiene por qué mantenerse constante. La evolución de una forma viva no se comprende por su capacidad de adaptación a una clase de entorno, sino por su capacidad de independencia respecto de las variaciones de tal entorno. La llamada presión selectiva no se produce por una competencia ante un reto determinado, sino que es el resultado de un aumento de la incertidumbre del entorno. El concepto de progreso es un concepto que a biólogos como Gould les pone los pelos de punta. Si progresar es ganar independencia respecto de la incertidumbre del entorno, entonces ... ¡Claro que hay líneas progresivas y líneas regresivas! Cuando la incertidumbre aumenta, la complejidad de los sistemas

tiende a aumentar, es el aspecto vertical de la evolución. Cuando la incertidumbre es baja, lo que aumenta es la diversidad, es el aspecto horizontal de la evolución. Los dos aspectos se alimentan mutuamente ya que una buena diversidad supone un buen conjunto de posibles para que la selección natural seleccione. El aumento de la complejidad puede traducirse ¿por qué no? en una línea progresiva. Gould argumenta en uno de sus últimos libros [] que el aparente aumento de complejidad de los individuos vivos es una ilusión, que si aumenta es porque no puede disminuir. Lo compara a los bandazos aleatorios de un borracho que camina paralelo a un muro: como no puede atravesar el muro, la tendencia es hacia la calzada. La posición de Gould equivale a renunciar a comprender.

Otra manera de crear una nueva identidad es a partir de dos viejas identidades. Es cuando dos individuos se asocian para crear un nuevo. Existen como mínimo dos grandes modos para generar asociaciones viables: entre individuos similares —digamos en sentido amplio: sociedad— y entre individuos distintos —digamos en sentido literal: simbiosis. El primer caso abarca desde el concepto de familia hasta el de sociedad propiamente dicha, pasando por el de mero agregado, conjunto gregario o tipo manada. Se trata de una situación fundamentalísima que explica cómo los individuos escalan los niveles jerárquicos de la organización de la materia viva. La idea es clara en nuestro contexto:

El individuo sacrifica algo de su identidad individual a cambio de ganar algo de independencia respecto de la incertidumbre de su entorno

El sentido de la selección natural también adquiere ahora un brillo especial:

El individuo aumenta su dependencia con otros individuos similares y se integra en un conjunto que es viable si es menos dependiente de la incertidumbre del entorno, de lo que lo son los individuos por separado

Los ejemplos son interminables. Un ñu solitario depende más de las inclemencias del entorno que un ñu en manada. Los pingüinos regulan mejor las fluctuaciones de temperatura gregariamente ... La identidad de un individuo construido por asociación puede ser tan fuerte que su nueva unidad se hace irreversible. Eso es sin duda lo que ocurre con los insectos sociales. La colonia de hormigas es, sin la menor duda, un individuo vivo más independiente de la incertidumbre del entorno (¡y más complejo!) que cualquiera de sus miembros (es más que la mera suma de complejidades). El tema adquiere aquí matices apasionantes ¿Cómo fue el tránsito hacia los primeros metazoos? Durante miles de millones de años sólo hubo bacterias cuya independencia fue transformando el entorno. No sabemos cómo, pero hace unos cientos de millones de años, el método de crear nuevos estados estacionarios por asociación dio

sus primeros frutos. Hoy sabemos que, en condiciones desfavorables del entorno, muchas bacterias se agregan [10, 11] estableciendo entre ellas incluso vínculos mecánicos, lo que confiere al conjunto una textura de fina y consistente película. Reaparece la misma idea: el aumento de la incertidumbre del entorno es la presión que anima la escalada a través de las sucesivas estructuras jerárquicas.

Otra manera de crear una nueva identidad por asociación es por la integración de dos o más individuos diferentes. Es la **simbiosis**, un hermoso fenómeno que ha dado lugar a elegantes propuestas sobre la evolución de las especies []. La idea se lee aquí, en esencia, como en el caso anterior de la asociación:

El resultado de la simbiosis es más independiente respecto de la incertidumbre del entorno, que cualquiera de los simbioses por separado

Además, la simbiosis no es en general una mera yuxtaposición de identidades diferentes. Entre los elementos que pactan una simbiosis suele haber una interacción no nula, lo que genera un nuevo individuo cuya independencia es incluso mayor que la de la suma de sus partes. Las ilustraciones aquí son también sencillamente inagotables. Digamos sólo que una célula que come bien y se mueve mal se puede aliar íntimamente con otra que come mal pero que se mueve bien, para inventar una nueva célula nueva mucho más independiente de la incertidumbre del medio que cualquiera de las dos firmantes del pacto. Margulis ha mostrado la potencia generadora de la simbiosis en microorganismos y nadie duda que tal cosa se extienda con enorme insistencia en todos los sentidos de la organización biológica. La presión de la incertidumbre del entorno es el gran estímulo para el establecimiento de pactos simbióticos.