

Un microscópico ménage à trois pudo ser el origen de un gran paso en la evolución.

Doña bacteria y sus dos maridos*

DORION SAGAN **
LYNN MARGULIS***

La *Amoeba proteus*, un microbio unicelular con núcleo, llamada así por su fluída y siempre cambiante forma, guarda en su pequeño cuerpo una gran historia de transmutación.

Un organismo como éste, una masa gelatinosa y vibrante, fue el que inspiró probablemente el género de películas baratas de horror como *The Blob*. En la vida real las amibas suelen ser criaturas predecibles. Por ello, el profesor Kwang Jeon de la Universidad de Tennessee, se quedó asombrado al ver con ayuda de su microscopio, que su colección de cepas de amibas sufría una gran epidemia.

Se podían ver en cada amiba aproximadamente 150 000 puntos, y cada punto era una bacteria perfectamente definida. Estas bacterias no habían estado ahí an-



* Publicado originalmente en *Natural History* 3(87): 26-33 con el título *Bacterial Bedfellows*. Derechos de traducción cedidos a la revista CIENCIAS por los autores. Traducción: César Carrillo T, revisada por Antonio Lazcano A.

** Escritor de ciencia, especializado en Geología y Biología Evolutiva

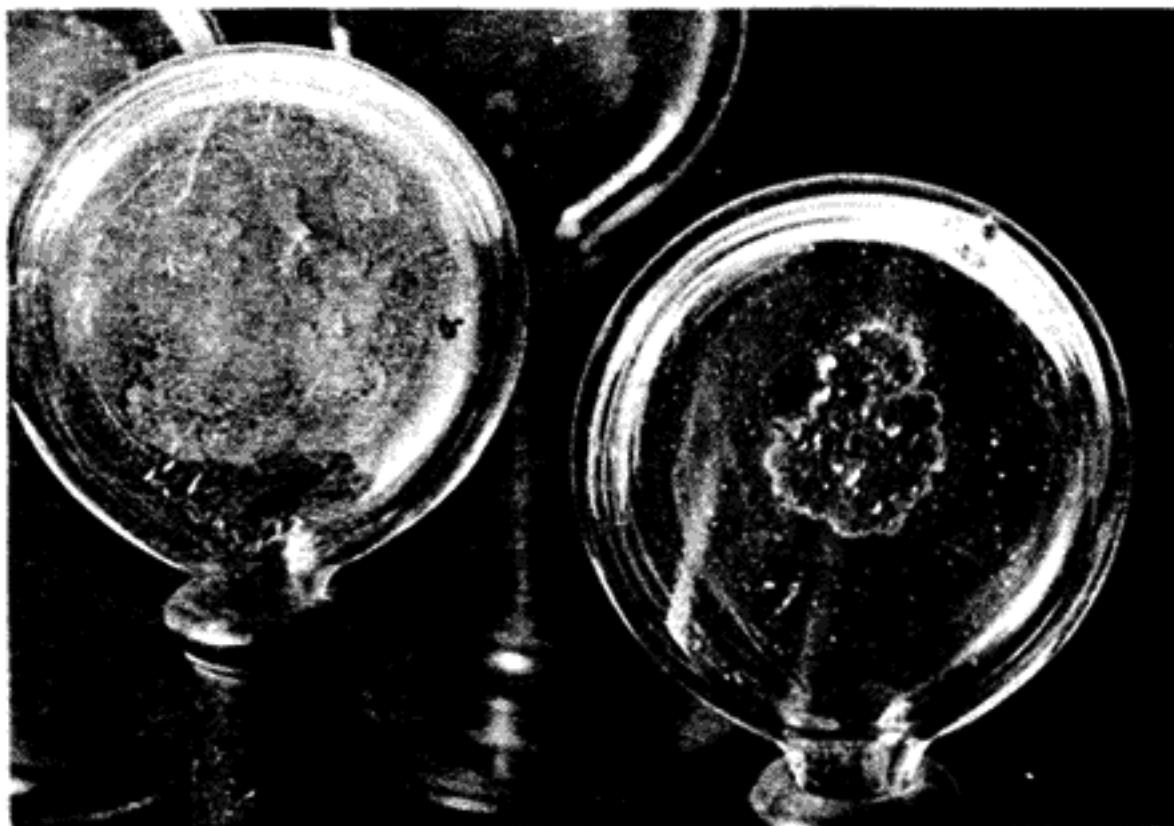
*** Profesora de Biología de la Universidad de Boston y Directora del programa de internos sobre Biología Planetaria de la NASA

tes, pero ahora crecían dentro de las amibas destruyendo las colecciones de Jeon. Este retiró las amibas enfermas que aún sobrevivían y mantuvo un registro de los avances de su enfermedad durante los siguientes meses. Aquellas que aparentemente eran más resistentes a los invasores recuperaron la salud y empezaron a crecer casi a su ritmo original. Jeon examinó a los sobrevivientes y encontró que cada una de ellas contenía aún a las bacterias invasoras, y no pocas, sino alrededor de 40 000. ¿Se había *A. proteus* transformado de alguna forma, incorporando a los invasores en su propio sistema? ¿Se habían fusionado infectores e infectados?

Cuando Jeon se preguntó si el núcleo de la amiba podía ahora vivir sin la bacteria que había sido originalmente patógena, la respuesta resultó ser negativa. Cuando transplantó el núcleo de las amibas infectadas a las amibas sanas y sin bacterias, el híbrido murió a los cuatro días. Pero si en el último momento se re-infectaban estos híbridos con los "parásitos" originalmente letales, las amibas revivían y crecían. Hoy en día estos seres mutualistas viven en Knoxville, Tennessee, en perfecto estado de salud.

Jeon pudo observar la evolución en acción. Es más, observó la evolución de un nuevo organismo por simbiosis y no como resultado de una acumulación de mutaciones. Las nuevas amibas no resultaron de una evolución de millones de años, sino que el proceso llevó tan solo dieciocho meses, lo que geológicamente hablando representa un instante. La selección natural no eliminó a los competidores, sino a la competencia misma. Después de que el humo de las batallas se hubo disipado, solamente sobrevivieron simbiosis —bacterias y amibas— que pudieron trabajar y vivir juntos. (En realidad este resultado no nos debería sorprender, los parásitos mortíferos no solamente destruyen sus hospederos, sino también sus posibilidades de continuar su supervivencia).

La historia de Jeon sugiere una respuesta a uno de los mayores rompecabezas de la evolución. De todos los eslabones perdidos en la evolución, ninguno es tan profundo como el hueco que existe entre los eucariontes, es decir las células con núcleo, y las bacterias que carecen de núcleo. La diferencia entre las bacterias y cualquier célula con núcleo hace que la diferencia entre la gente y los simios parezca desdeñable. Las célu-



Tomado de: Doce Mil Grandes, Ciencias Naturales

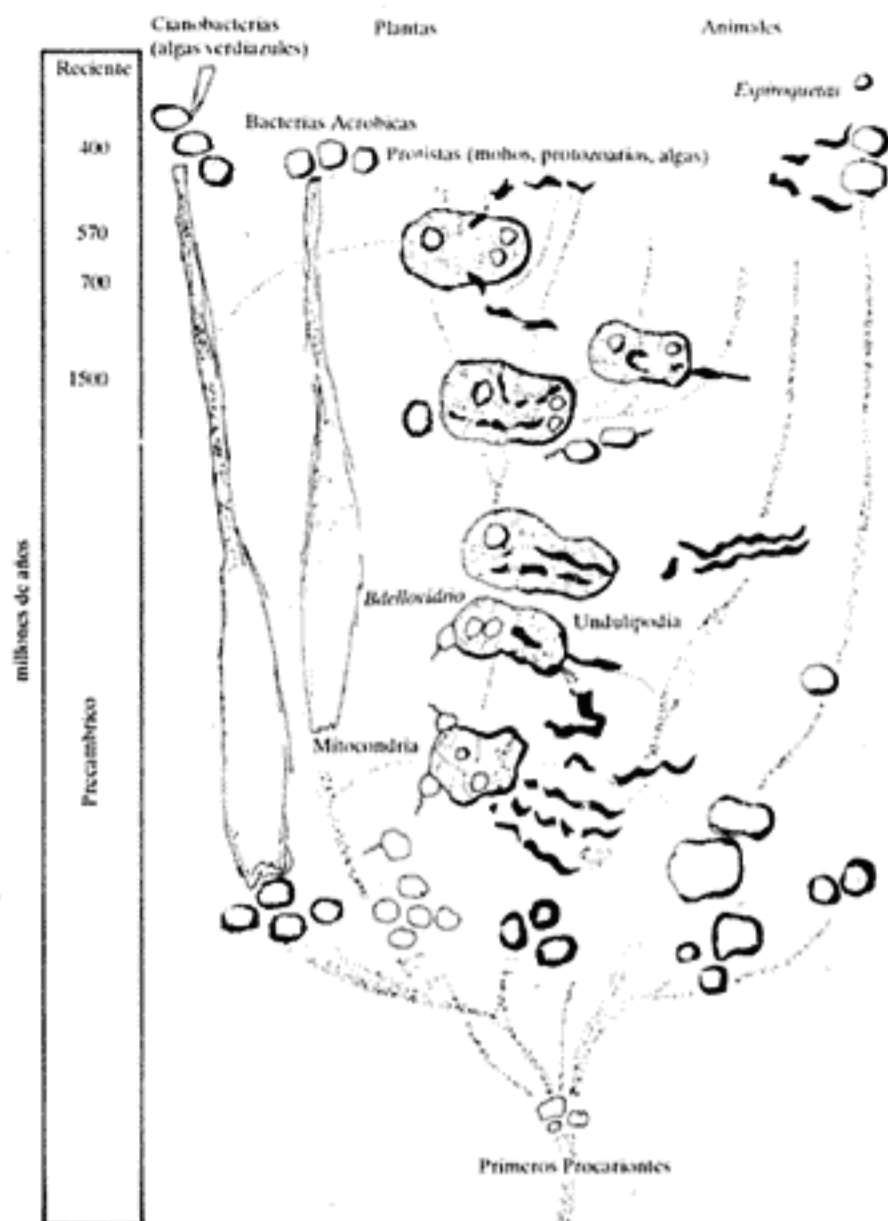
las de las plantas y de los animales tienen más en común entre sí que las células de las bacterias y de aquellas que poseen un núcleo. Las células con núcleo contienen hasta mil veces más material genético que sus parientes más pequeñas. Este material se encuentra fuertemente enrollado en el interior de los cromosomas que están contenidos en un núcleo limitado por una membrana.

Las células con núcleo se dividen a través de una compleja "danza de los cromosomas", durante la cual los cromosomas se llevan el material hereditario hacia los extremos opuestos de la célula, la que después se divide. Las células bacterianas simplemente se separan en dos partes, y no forman cromosomas. Las bacterias se permiten una amplia gama de variaciones metabólicas: consumen nitrógeno y azufre, producen metano, precipitan fierro y manganeso mientras respiran, y pueden crecer en agua hirviendo y en salmuera. Las bacterias obtienen su comida y energía usando todo tipo de fibra vegetal y desperdicios animales. Si esto no ocurriera nos encontraríamos viviendo en medio de un creciente montón de basura.

Un examen microscópico de las aguas del planeta durante el Proterozoico, hace 2500 millones de años, nos habría revelado cantidad de agitadas flotillas de esferas moradas, azulverdosas, rojas y

amarillas: colonias de organismos amontonándose sobre las rocas, deslizándose sobre el agua o empujándose con colas ondulantes. Bancos de células bacterianas movidas por las corrientes, cubriendo las piedras de brillantes matices. Esporas bacterianas movidas por la brisa bañaban los terrenos fangosos. Su material genético, el ADN y el ARN, no se encontraban delimitados; sus genes no estaban empacados en los cromosomas ni rodeados por una membrana nuclear. Se reproducían asexualmente creciendo al doble de su tamaño replicando su único filamento de ADN, y así dividiéndose, con una copia de su ADN yendo a cada una de las células nacientes. Así, una pequeña célula conteniendo un juego completo de material genético brotaba y se separaba de su progenitor. También podían conservar su ADN en esporas que sobrevivían durante largos períodos de sequía, esperando revivir cuando las condiciones fueran más húmedas o en su conjunto más favorables. Hace 1500 millones de años, la superficie y la atmósfera de la tierra eran muy similares a las de ahora y las bacterias florecían. Al igual que ocurre ahora, la vida microbiana permeaba el aire, la tierra y el agua, reciclando gases y otros componentes.

Nuevas formas de vida aparecieron en este medio. Se formó un nuevo tipo de célula, más grande y más compleja que



Durante el Precámbrico se unieron dos antiguas bacterias que carecían de núcleo (procariontes), convirtiéndose una en un organelo especializado al interior de la otra. El producto de tales fusiones fueron células eucariotas, células con núcleo, de las cuales surgieron todos los seres vivos, con excepción de las bacterias. Una bacteria aeróbica, como *Bdellovibrio* o *Daptobacter*, penetró en el ancestral *Thermoplasma* convirtiéndose en la mitocondria de las nuevas células. Los undulipodia (cilios, flagelos) pudieron haberse formado cuando veloces espiroquetas invadieron las nuevas células, confiriéndoles movimiento. Algunas cianobacterias fueron comidas por las nuevas células formando plástidos, los cuales realizan la fotosíntesis al interior de las células de las plantas.

la bacteriana. Estas células tenían canales y redes de membranas internas, incluyendo una que envolvía al núcleo. Poseía unos organelos llamados mitocondrias: cuerpos oscuros que proveían a la célula con energía derivada del oxígeno. Algunos adquirieron pronto a los plástidos, paquetes ricos en clorofila, suspendidos en el citoplasma, en donde ocurre la fotosíntesis.

¿Qué originó esta nueva célula? Como ocurre con los otros problemas evolutivos, la solución al misterio del origen de la célula nucleada reside en evidencias circunstanciales. La historia debe ser reconstruida a partir de las claves existentes. Si los ancestros de la mitocondria fuesen bacterias sin núcleo que atacaron y se reprodujeron en el interior de sus hospederos sin matarlos —en una forma similar a las “manchas” de Kwang Jeon— una línea ancestral de células complejas se hubiese establecido. No habría registro fósil de las formas transitorias, ya que el nuevo ente habría evolucionado rapi-

damente, resultado de una fusión interespecífica.

Imaginemos al ancestro de la mitocondria: una atacante bacteriana, capaz de respirar oxígeno o de prescindir de él cuando es necesario. Tales depredadores microscópicos aún existen. *Bdellovibrio* (en griego *bdello* quiere decir sanguijuela; *vibrio* se refiere a su vibrante forma de coma) rompe en pedazos su presa bacteriana, comiéndosela desde el interior. *Daptobacter* (la “bacteria roedora”) penetra tanto en las membranas internas como externas de las paredes celulares de su víctima. Una vez adentro, se divide una y otra vez.

La presa original del ancestro de la mitocondria debe haber sido una bacteria más grande, como la actual *Thermoplasma*. El ADN de *Thermoplasma* es distinto del de otras bacterias y similar al de los eucariotes. Esta bacteria vigorosa puede sobrevivir en aguas calientes y ácidas, tal y como las de los manantiales del

Parque Nacional de Yellowstone, donde fue descubierta.

Es probable que en un principio muchos hospederos similares a *Thermoplasma*, al ser invadidos por las bacterias atacantes fallecieran, y con ellas morían también los invasores.

Con el tiempo, algunas de las presas desarrollaron una cierta tolerancia hacia sus depredadores aeróbicos, los cuales se mantuvieron vivos en el interior de las células en donde había alimento en abundancia.

Al reproducirse dentro de las células invadidas sin causar daño alguno, los depredadores fueron abandonando gradualmente su independencia. Ambos organismos aprovechaban los desechos del metabolismo del otro.

Las víctimas invadidas y las mitocondrias así domesticadas se recuperaron del ataque y han vivido desde entonces, durante casi 1000 millones de años, en una alianza dinámica, gracias a las mitocondrias. Todos los organismos formados por células con núcleo —lo que incluye hongos, plantas, animales, humanos y todos los organismos, con excepción de las bacterias— poseen un metabolismo extraordinariamente similar.

La presencia de ADN en mitocondrias dió las primeras pistas a los científicos de la posibilidad que estas estructuras hubieran sido alguna vez bacterias de vida libre. Al ser examinado, el ADN mitocondrial resultó ser más parecido al de ciertas bacterias de vida libre, que al del núcleo de la célula de la que provenía la mitocondria. Las mitocondrias tienen sus propios genes, su propio ritmo de reproducción y con frecuencia su división no está coordinada con la del resto de la célula. La bacteria que se convirtió en mitocondria de nuestras células puede ser vista como un asaltante que logró dominar a su hospedero y formó células con núcleo, células ancestros de todas las formas de vida vegetal y animal del planeta.

Si sabemos buscar adecuadamente podemos ver aún este tipo de fusiones.

En una escena de la excelente película muda llamada “Extraños Intimos”, el botánico David C. Smith, de la Universidad de Oxford, se detiene sobre las arenas de una playa de las costas de Bretaña, Francia. A sus pies se encuentra lo que parece ser un alga marina. Pero cuando Smith empieza a pisar la materia verde —cuyo aspecto recuerda al de una espinaca— ésta se encoge, hundiéndose en la arena. Muy pronto lo único que

queda en ese sitio es un pedazo limpio de playa.

¿A donde se fue la mancha verde? De hecho, no es "la" sino "las". Los *Convoluta roscoffensis* son platelmintos y en el interior de sus cuerpos traslúcidos viven algas verdes. Molestos para los bañistas, estos organismos siempre han desconcertado a los biólogos. Los platelmintos y las algas se fusionaron dando origen a una criatura compuesta. Yacen en una densa masa verde sobre las orillas y en lugar de comer, fabrican su propia comida con la luz del sol y el aire. Parecen plantas, pero al ser pisadas por un vacacionista o atacadas por un predador, se hunden rápidamente en la arena buscando protección. Las algas no solamente viven en el interior del platelminto produciendo comida para él, sino que también reciclan los desechos del gusano, tales como el ácido úrico, a los que convierten en más comida. Gracias a esta relación simbiótica, los platelmintos adultos no tienen que buscar sus alimentos, por lo que su boca permanece cerrada todo el tiempo.

La simbiosis, es decir, la vida en conjunto de dos o más organismos de diferente tipo, en asociación íntima, no es tan sólo una rareza ocasional, es un mecanismo básico del proceso evolutivo. Algunas plantas y animales se habrían extinguido desde hace mucho tiempo de no ser ayudadas por sus compañeros: hay camarones ciegos que son conducidos por los peces, las plantas con flores necesitan ser polinizadas por ciertos insectos y las vacas y otros rumiantes no pueden digerir sin la ayuda de las bacterias que viven en sus estómagos. Los humanos también requieren de bacterias vivas en sus intestinos. Tenemos trillones de células animales, y diez veces más de células bacterianas.

A pesar de que se conocen muchas plantas y animales simbiotes, es en el microcosmos donde la simbiosis y su papel fundamental en la evolución se hacen realmente conspicuos.

Quizá cien millones de años después de que las mitocondrias se habían originado, un nuevo tipo de organismo se unió a ellos incorporándose al plasma de ciertas células. Pero la génesis de la unión no fue a través de una infección, sino de una ingestión. Así como Jonás fue tragado por la ballena, los antepasados de las partes fotosintéticas de las células con núcleo fueron engullidos por células más grandes, pero lejos de ser destruidos, encontraron refugio dentro de éstas, resistiéndose a ser digeridos y conservando vivos sus valiosos pigmentos. Hoy en día, encerrados en el interior de los vegeta-

les, estos organelos, los plástidos, fabrican alimentos a partir del agua y el sol. Los cloroplastos son plástidos verdes y son aún más grandes y más parecidos a las bacterias que las mitocondrias. Las plantas se orientan hacia el sol porque sin este movimiento los plástidos de adentro morirían.

Los plástidos proveen a la biósfera de comida y oxígeno. Desde un punto de vista planetario, el papel principal de los mamíferos puede ser el de fertilizadores de plantas y portadores de mitocondrias. Pero si todos los mamíferos muriesen repentinamente, los insectos, las aves y otros organismos portarían las mitocondrias y fertilizarán a las plantas. Si las plantas con sus plástidos desapareciesen súbitamente, la producción de alimentos se vería tan fuertemente impedida que todos los mamíferos seguramente morirían. Un tipo de célula que no existía antes se volvió rápidamente indispensable para las generaciones sucesivas. La nueva célula tenía ahora mitocondrias para el metabolismo del oxígeno y plástidos para proveer comida. Ambos fueron productos de fusiones bacterianas. La pregunta que queda es si la habilidad de la célula para moverse —aún dentro de su propia pared celular— es también producto de otra fusión simbiótica.

Si se observa una célula eucarionte con ayuda del microscopio, se puede observar un movimiento vigoroso en su interior. En contraste con la célula bac-

teriana, cuyos constituyentes carecen de movimiento o vagan pasivamente, el interior de la célula eucarionte se encuentra en eferescencia constante, como una ciudad. El citoplasma fluye y muchas células se expanden y se contraen rítmicamente, a veces con gran rapidez. Por ejemplo, en un camaleón que está cambiando de color, las partículas del pigmento son transportadas de la superficie hacia el interior de las células cuando la piel del animal se vuelve más clara.

Nosotros creemos que el movimiento celular realizado por las células con núcleo puede ser el resultado de una fusión simbiótica con otro tipo de procarionte: la rápida y agitada espiroqueta, una bacteria que se mueve rápidamente como pequeños látigos. Un estudio detallado de los apéndices de muchos tipos de células con núcleo muestra una asombrosa uniformidad. Estos filamentos han sido tradicionalmente llamados flagelos si son largos y escasos, como las colas de los espermias, o cilios si son cortos y numerosos, dando un aspecto de cabellera. Como no hay diferencias básicas entre ellos, a todos los llamamos undulipodia. Prácticamente todas las algas y los ciliados —los primeros organismos con células nucleadas que surgieron— los tienen. Estamos estudiando ahora la idea de que los undulipodia provienen de las espiroquetas, es decir de los más pequeños, más rápidos y más ágiles miembros del microcosmos.

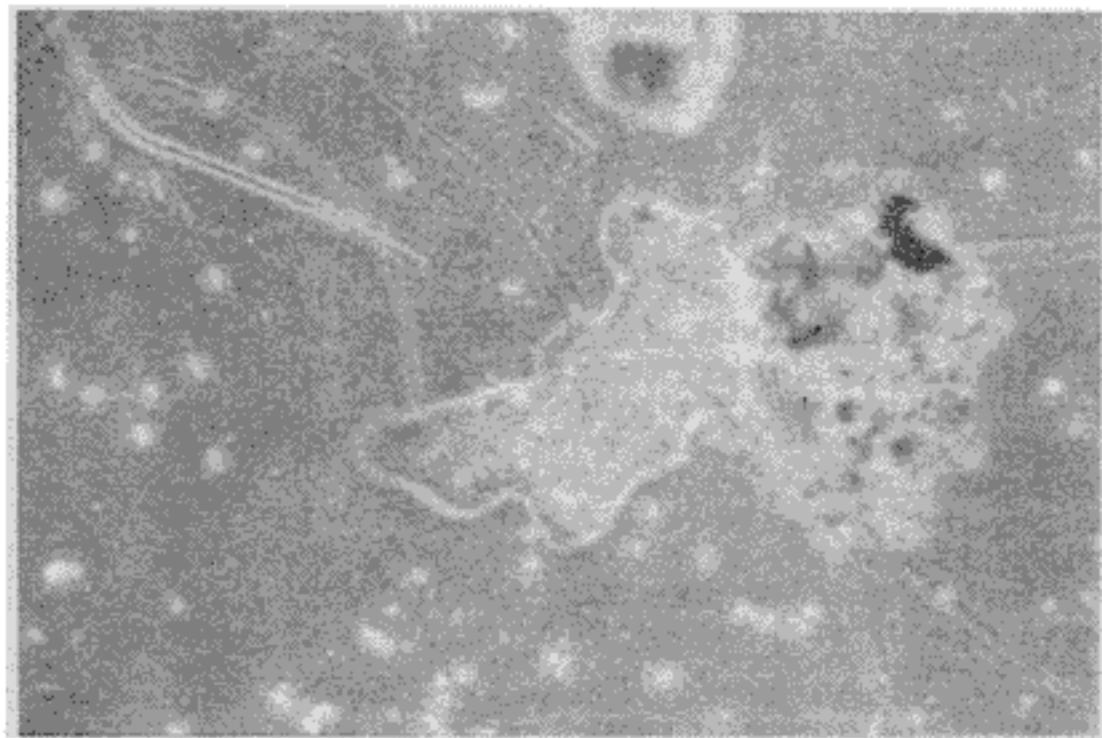
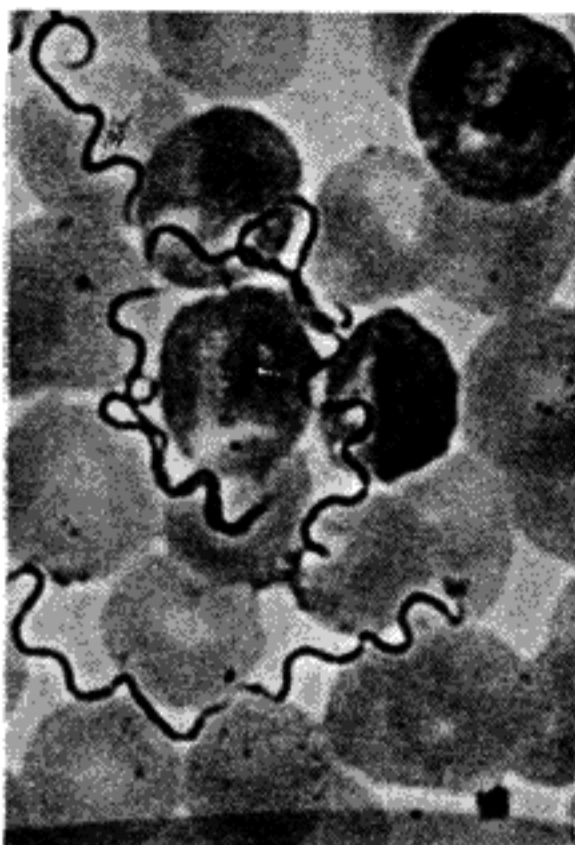


Foto: Alejandro Martínez



Tomado de: La Célula, Time Life

Con su aspecto de sacacorchos o de pedazos de pasta fusillini (como tallarines retorcidos) las espiroquetas prosperaron en muchos ambientes y se encuentran lo mismo en el suelo de los jardines que en las encías de los humanos. Algunas usan oxígeno, otras se envenenan con él. Tienden a pegarse a lo que encuentran, esté vivo o no. Forman parte de las comunidades microbianas que viven dentro de los abultados intestinos de las termitas. Pueden ser vistas afianzadas a la superficie de organismos unicelulares más grandes, de donde obtienen sus alimentos.

Es probable que hace unos 2,000 millones de años, un organismo impulsado por el movimiento de espiroquetas encontrara más comida y se reprodujera más rápidamente, por lo que la selección natural favoreció la alianza simbiótica.

Algunos tipos de amibas actuales guardan su undilipodia y se atiborran de alimento cuando la comida es abundante, pero cuando la comida es escasa, les crece una cola para poder nadar en busca de alimento. El advenimiento de las simbiosis de las espiroquetas habría alterado el microcosmos, llevando a la primera célula animal —una especie de *ménage a trois* simbiótico formado por *Thermoplasma*, mitocondrias y espiroquetas. Las células de las plantas pueden también ser vistas como asambleas multiespecíficas, a las que hay que adicionar los plástidos.

Probar la *spirochete connection* es difícil. Mientras las bacterias se fusionan, los genes promiscuos se mezclan y es muy difícil distinguir a los cónyuges originales. La integridad de los individuos es sacrificada en aras de la formación de

una nueva célula. Como señala Smith, lo que queda en el interior de una célula después de una asociación simbiótica y miles de años de vida es únicamente la sonrisa del gato de Cheshire: "el organismo pierde poco a poco piezas de sí mismo, mezclándose lentamente en el medio que le rodea; y su propia existencia sólo puede ser deducida al ser traicionada por algún relicto".

Las nuevas técnicas de la genética molecular han demostrado que partes del organismo disminuyen al estar dentro de otras células vivientes. Las bacterias pueden donar y recibir cierto número de genes, intercambiándolos no sólo entre sí, sino también con los virus y las células con núcleo. La libre transferencia de partes y piezas de seres vivientes de un área de la célula a otra, puede ayudar a entender la manera en que los organismos simbióticos se convierten en sistemas más simples que sus formas originales. La maleabilidad de la vida microbiana es explotada por los ingenieros genéticos cuando identifican las proteínas que desean producir en gran cantidad, como la insulina humana, y colocando sus genes en el interior de bacterias capaces de una prodigiosa y rápida reproducción. Vale la pena señalar, sin ánimo de minimizar el esfuerzo de los científicos, que las bacterias han estado utilizando las técnicas de la "ingeniería genética", es decir la transfe-

rencia de genes, durante miles de millones de años.

En la visión tradicional de un sanguinario mundo darwiniano, las formas de vida simbióticas siempre han sido consideradas como fusiones raras, aberraciones de la ley de la selva que el poeta Tennyson caracterizó como "rojo en diente y garra". Y sin embargo las plantas y animales jamás habrían evolucionado si no fuera por los ataques y defensas, que fueron seguidos de relaciones de simbiosis y reciprocidad. Alianzas difíciles de concebir se encuentran en el origen de múltiples y variados seres vivos. La individualidad y la independencia son ilusiones en el mundo de la biología.

Vivimos en un fluido paisaje puntillista, donde cada punto de pintura también está vivo. La tierra misma es un habitat viviente, una fusión de organismos que se han asociado formando nuevos organismos y tipos completamente nuevos de "individuos", tales como las hidras verdes y los peces luminiscentes. Ninguno de nosotros sobreviviría sin los demás organismos. A la luz de este fenómeno comenzamos a ver ahora a la biósfera, no solamente como una lucha que favorece al organismo más sanguinario, sino también como una danza sin fin de formas de vida diversificadas en la cual los asociados triunfan.

