

# La sonrisa del gato

## Mitosis y movilidad celular: un mismo origen simbiótico.

LYNN MARGULIS

**S**imbiosis es la asociación física duradera de organismos de diferentes especies. La simbiogénesis es una consecuencia evolutiva de la simbiosis, y es a su vez el proceso que lleva a la formación de nuevas estructuras y funciones, producto de la convivencia durante largo tiempo de dos o más organismos.

El término simbiogénesis fue acuñado en 1909 por Konstantin Sergeivich Merzhkovsky (1855-1921), un notable biólogo ruso que escribió un libro cuyo título es *La Teoría de los dos plasmas como base de simbiogénesis: un nuevo estudio del origen de los organismos*, en donde hace algunas sugerencias particularmente interesantes. Sin embargo, su predecesor y colega Andrei Sergeivich Famintzin, fundador de uno de los pocos laboratorios de fisiología vegetal de San Petersburgo, ya intuía algo, pues día tras día rompía células vegetales para extraerles los plástidos y ponerlos a crecer, convencido firmemente de que se trataba de cianobacterias atrapadas. Sobra decir que, por razones obvias, nunca tuvo éxito, pero conceptualmente se encontraba en el camino correcto.

Al mismo tiempo y de manera completamente independiente, Ivan Emmanuel Wallin, profesor de Anatomía de la Universidad de Colorado, acuñó la palabra simbioticismo. En 1927 escribió un maravilloso libro cuyo título es *Symbioticism and the Origin of Species*, en donde desarrolla tres puntos que me parecen



John Tenniel

muy correctos, de los cuales sólo uno es aceptado actualmente. El primero es que, por un proceso de simbiosis, las mitocondrias se originaron de bacterias aerobias. El segundo, que en las células de animales y plantas, la interrelación entre los simbioses, esto es, la dinámica poblacional entre las mitocondrias y los demás habitantes que constituyen la célula, es el proceso que subyace al fenómeno de diferenciación celular; y por último, que la adquisición de simbioses microbianos, sobre todo de bacterias, es el mecanismo más importante en el origen de las especies. No hace falta decir que fue ignorado.

Paralelamente, en 1924 Boris Kozo-Polyanski, otro ruso, propuso que los organelos que proporcionan movilidad a la célula son relictos de bacterias móviles, que él llamaba citoides flagelados. Kozo-

Polyanski se dio cuenta de las implicaciones de su idea, pues creía que al convertirse en parte integral del citoplasma celular, estas bacterias podrían tener influencia en sus procesos internos, incluyendo la división celular. Me parece que fue la única persona que pensó en estos organelos en términos de simbiosis. Desafortunadamente su libro nunca ha sido traducido al inglés, y sus ideas han permanecido prácticamente desconocidas entre los científicos occidentales, aunque actualmente L.N. Khakhine prepara un libro en el que aparecerá un texto de Kozo-Polyanski y que será publicado por la Universidad de Yale.

### ¿Hay gato encerrado?

¿Cuáles son los criterios para establecer el origen simbiótico de un organelo? No

Lynn Margulis. Departamento de Botánica, Universidad de Massachusetts. Conferencia pronunciada en el Salk Institute, La Jolla, California. Febrero de 1992.

Traducción de Nina Hinke y César Carrillo

estoy hablando de virus, plásmidos, ni de cualquier otro tipo de replicones, sino de entidades que se encuentran rodeadas por su propia membrana, de entidades realmente autopoieticas. Es decir, de organismos que alguna vez fueron totalmente libres, y que ahora son simbiontes obligados.

Un organismo que alguna vez fue de vida libre, que se vuelve simbiote y evoluciona en organelo por integración genética, inicialmente debe tener su propio ADN característico, y RNA mensajeros codificados por él. Debe tener toda una batería de polimerasas para sintetizar tanto el ADN como el ARN, como lo hacen todas las células y, sobre todo, debe de estar rodeado por una membrana que él mismo sintetiza, la cual debe de contar con canales iónicos integrados que controlen la composición interna.

Esto es en teoría lo que debe de tener inicialmente un organismo al entrar en simbiosis. Además, el organelo se tiene que parecer más a algún microbio de vida libre conocido que al resto de la célula en que reside.

Todos estos criterios se pueden aplicar sin dificultad alguna a los plástidos de algas y plantas, y por supuesto que los

plástidos se parecen más a las cianobacterias —que producen oxígeno y poseen clorofila *a*— que al resto de la célula en que viven. Y si estos mismos criterios se aplican a las mitocondrias, es claro que éstas se parecen más a ciertas eubacterias que respiran oxígeno, que al resto de la célula que habitan. Es por ello que tales criterios pueden ser generales.

De lo anterior surge una manera distinta de ver la evolución, según la cual la célula eucarionte no proviene de una célula individual, de alguna bacteria que habría evolucionado gradualmente, dando lugar a la aparición de características nuevas y cada vez más complejas. Por el contrario, la célula eucarionte sería el resultado de la estrecha interacción de diversos organismos, en la cual cada precursor aporta un módulo completo de genes que conlleva una serie de habilidades bioquímicas.

Todo esto nos lleva a establecer una división entre las células que poseen un sólo genoma (homogenómicas), que comprenden a las eubacterias y arqueobacterias, conocidas como procariontes, y las eucariontes, que poseen un núcleo delimitado por una membrana característica que las define, y que tienen diferentes

genomas, como el de las mitocondrias y el de los cloroplastos. Así, por ejemplo, en las plantas tenemos por lo menos tres genomas de distinto origen: el del nucleocitoplasma, el de la mitocondria, y el de los cloroplastos.

### La sonrisa del gato

No siempre es fácil encontrar las evidencias para reconstruir este tipo de historias evolutivas. Existe una relación paradójica entre la simbiosis y sus evidencias. Cuando los organismos viven juntos en armonía casi perfecta, se vuelven prácticamente indetectables. Sir David Smith FRS, un distinguido botánico que actualmente se encuentra en la Universidad de Edimburgo), compara lo que ocurre en estos casos con la manera en que progresivamente se esfuma el gato de Cheshire de *Alicia en el País de las Maravillas*, dejando tras de sí únicamente una sonrisa enigmática: "el organismo pierde paulatinamente piezas de sí, lentamente, confundándose con el fondo general. Su existencia sólo se delata por algún relicto".

La movilidad de la célula eucarionte podría ser producto de uno de estos casos. La capacidad de movimiento de las células eucariontes, tanto interno como externo, no tiene paralelo en los procariontes. Los eucariontes poseen apéndices en forma de látigo que les permiten nadar en medios acuosos o acarrear material hacia su interior, y pueden moverse formando tentáculos. Reacomodan sus organelos de manera individual. Durante la mitosis —proceso de división celular característico de los eucariontes— los cromosomas se colocan en el centro de la célula que se va a dividir, y la mitad de cada uno de ellos es separada, migra hacia los polos, y parte con una de las dos nuevas células. Es lo que ha sido llamado "danza de los cromosomas".

Las bacterias carecen de todas estas formas de movimiento intracelular. Algunas pueden nadar con ayuda de flagelos, que son pequeños apéndices que han sido confundidos con el organelo que confiere movilidad a las células eucariontes, al cual hemos designado con el nombre de *undulipodio*. El flagelo es menos largo, posee un diámetro mucho menor, una estructura más simple y funciona por rotación. Por el contrario, el organelo eucarionte se encuentra completamente rodeado por una membrana celular. Se sa-



Modificación interna de una bacteria, probablemente una espiroqueta, para unirse a un protista zomastogínido no identificado, que vive en termitas. La bacteria unida muestra polaridad: un extremo curvo y denso se encuentra conectado a una porción cóncava del protista hospedero (x 75,000)

Cesar Carrizo I.



S. Miller, L. Margulis y A. Lazcano en el laboratorio de S. Miller.

be que el movimiento del flagelo está restringido a la parte superior, en donde rota al interior de la membrana. Si se corta el flagelo en varios trozos, éstos carecen de movilidad propia, y la parte superior sigue girando sola. En cambio, el organelo eucarionte es intrínsecamente móvil, ya que al ser cortado en pedazos, cada trozo se aleja nadando. Asimismo, el número de proteínas que constituyen el flagelo bacteriano es mínimo, no llegan a cinco, a diferencia del organelo eucarionte, que sobrepasa las 600. Por todo ello, el empleo de la palabra *flagelo* para designar la estructura motriz en eucariontes es completamente erróneo, ya que se trata de una estructura completamente distinta a la procarionte, y su aparente similitud se debe únicamente a una convergencia funcional.

Sería conveniente uniformar el término empleado para designar este organelo de movilidad que, por presentarse en una gran variedad de organismos eucariontes, ha sido designado con nombres tan diversos como cola de espermatozoide, cilio, mastigión, euflagelo, pasando por flagelo de eucarionte, lo cual es un grave error.

El nombre de *undulipodio* (del latín, pie móvil) me parece más adecuado, y además es fácil de pronunciar. Por ejemplo, en español se dice undulipodio y suena muy bien (mejor que en inglés). El uso de esta palabra empieza con O. Bütschli, en 1908, pasa a los textos rusos y posteriormente regresa a los alemanes con el libro de Max Hartmann. Lo ideal sería que tanto quienes trabajan con dinomastigotes, como con árboles de *Ginkgo*, o con espermatozoide de mamíferos, sepan que cuando alguien se refiere al undulipodio, está ha-

blando del mismo organelo el que confiere movilidad a la célula eucarionte, que mide cerca de un cuarto de micrón de diámetro, y cuya estructura interna presenta nueve pares de microtúbulos con dos microtúbulos individuales en el centro, dispuestos todos a manera de un disco de teléfono anterior a la era digital (lo que se conoce como el patrón de microtúbulos de  $9(2) + 2$ ).

### Un esbozo de oreja

Un undulipodio se encuentra siempre anclado en la base por una estructura llamada cinetosoma o cuerpo basal, a partir de la cual se forma. El cinetosoma está formado por nueve tripletes de microtúbulos ordenados en círculo. Cuando el cinetosoma se encuentra solo, sin el resto del undulipodio, es idéntico al centriolo, la estructura que aparece durante la mitosis en muchas células eucariontes, y que también presenta una estructura interna de nueve tripletes de microtúbulos dispuestos de la misma manera.

Mas no sólo la estructura es la misma. El mismo centriolo que va al polo mitótico puede ir del centro al borde de la célula, en donde genera el undulipodio. Es decir, el centriolo pasa a ser cinetosoma (por eso se llama "centriolo-cinetosoma"). Visto al microscopio, el centriolo parece un manojo de palillos a la deriva en el citoplasma. Un mayor aumento permite distinguir nueve pequeños manojos de tres palillos cada uno. Por ejemplo, al iniciarse la mitosis en la célula animal, el centriolo se reproduce justo antes de que los cromosomas se vuelvan visibles, y la pro-

genie migre a los polos opuestos de la célula. Los nuevos centriolos quedan en los extremos del huso mitótico, el cual está formado por una serie de hilos delgados a lo largo de los cuales los cromosomas se mueven hacia los extremos. Al terminar la mitosis, el centriolo migra hacia la superficie de la célula, y allí puede generar un undulipodio.

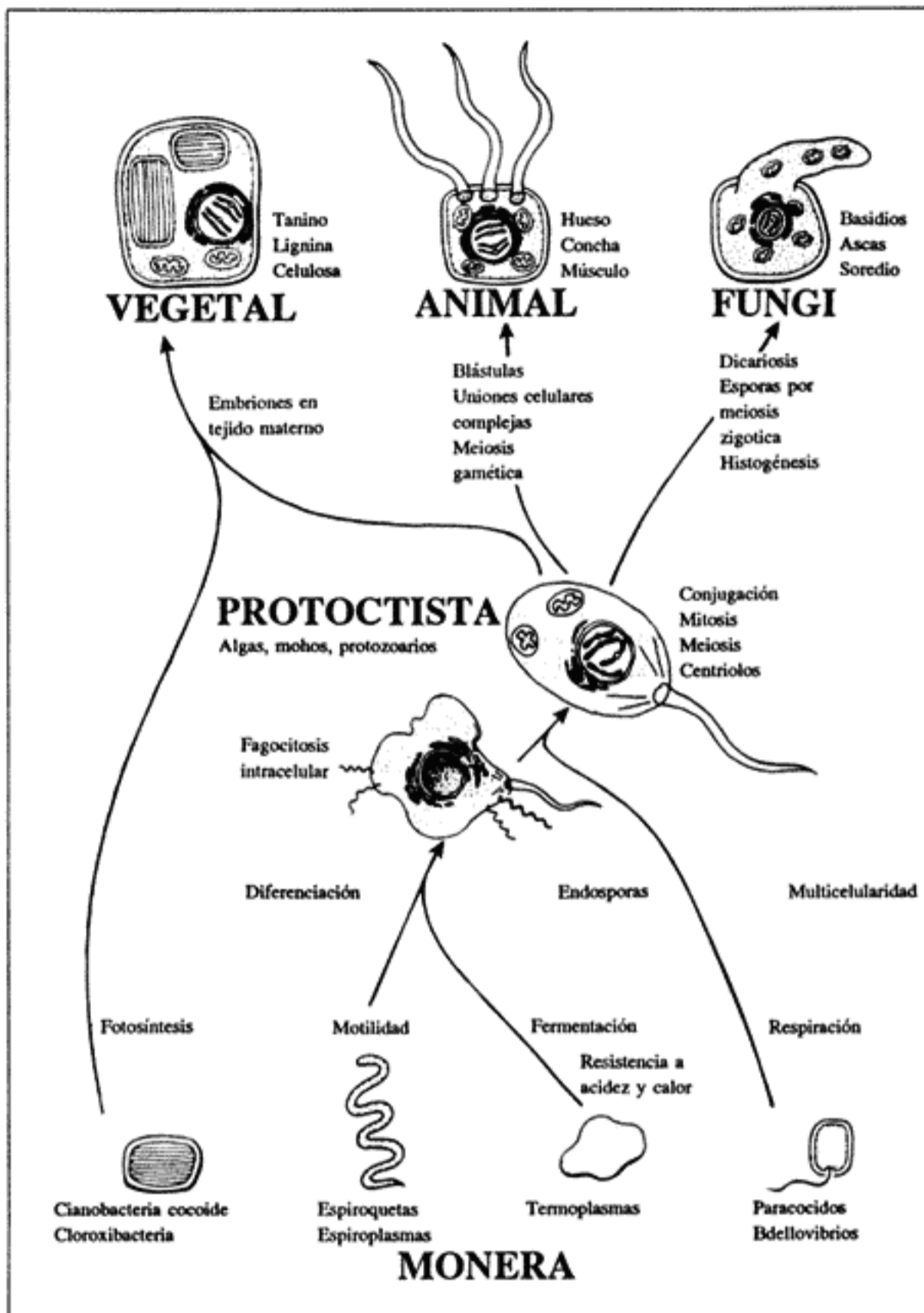
Además de tener la misma estructura y función, tanto el cinetosoma como el centriolo están formados por el mismo tipo de proteína, la tubulina, la cual se une formando estructuras en forma de pequeños túbulos, conocidos como microtúbulos. Los microtúbulos tienen un diámetro de 24 nanómetros y están constituidos por 13 protofilamentos de tubulina. Al analizar esta estructura se encontró que las paredes de los nueve pares de microtúbulos contienen grandes cantidades de alfa y beta tubulinas en proporciones equivalentes, las cuales alcanzan pesos moleculares cercanos a los 50 kilodaltones. Estos microtúbulos están muy conservados evolutivamente: se encuentran en el sistema nervioso —neurotúbulos—, en el huso mitótico, en la pared celular de las plantas, en todos los undulipodios, etc. Resulta interesante que al realizar el análisis comparativo empleando anticuerpos en diferentes organismos, en las casi 60 secuencias reportadas de estas proteínas se encontró un 80% de similitud, y en algunas proteínas se observaron regiones en donde se alcanza un 100%.

Aparte de estas proteínas, el undulipodio posee cerca de 600 proteínas adicionales, de las cuales cerca de 250 se encuentran en el eje y más de 350 en el cinetosoma. Algunas de ellas son exclusivas de el eje y otras del cinetosoma. En cambio, en el flagelo bacteriano y su cuerpo rotatorio sólo hay seis proteínas y unas treinta ligadas al desarrollo de la estructura.

Todo ello permite suponer que estas formas distintas de movimiento de la célula eucarionte tienen un origen común. Es decir, que el origen del undulipodio está relacionado con el de la mitosis. En mi opinión, ello se debe seguramente a la simbiosis entre una bacteria móvil y una bacteria parecida a la actual *Thermoplasma*, que formaron juntas el nucleocitoplasma, que albergó posteriores simbioses.

### Emerge el rostro

Al igual que las mitocondrias y los cloroplastos, el cinetosoma y el centriolo se re-



Esquema que muestra la teoría endosimbiótica de las células eucariotas.

producen por sí mismos en células animales, y en espermatozoa de plantas únicamente lo hace el cinetosoma. Esto ocurre independientemente del ciclo celular, y en realidad poco se sabe de ello. Hay un bello experimento realizado por L.R. Cleveland, quien murió en 1971. Él expuso células anaeróbicas a oxígeno, al aire, de tal manera que se disolvieran los cromosomas y el ADN desapareciera. Sin embargo, se reprodujeron cientos de cinetosomas conectados al huso mitótico, ocurrió la división celular, y al final aparecieron dos organismos, los que murieron cuatro días más tarde por carecer de

ADN. Cleveland mostró así la completa independencia fisiológica que existe entre los cromosomas y el huso mitótico.

En muchas células se ha visto que el undulipodio también se reproduce sin más. Por ejemplo, en las espermatofitas no se sabe cómo, pero los undulipodios aparecen por todos lados sin ton ni son. Esto se debe a la duplicación del cinetosoma que lo genera, que como ya se mencionó, se reproduce de manera independiente al ciclo celular. Estos procesos se observan en muchos de los proctocistas, un conjunto de aproximadamente 250 000 especies poco conocidas, ya que sólo

se vuelven famosos en el momento en que afectan al hombre (como ocurre con *Plasmodium*, que produce el paludismo, *Trypanosoma*, responsable del mal de Chagas, etc.), y cuyo estudio puede ser muy útil para entender el origen y la evolución de la mitosis.

En los ciliados, 10 000 organismos, casi todos unicelulares y de vida libre, cada especie es reconocida por el número y el patrón de agrupamiento característico de los cilios que se encuentran en su superficie. Cuando se altera la disposición de los cilios, cortando un pedazo de corteza con microcirugía y colocándolo al revés, este patrón es heredado por las células que se producen al dividirse la célula. Esto es una prueba más de la independencia de los undulipodios de los genes nucleares, al igual que las mitocondrias. Este hecho concuerda con la idea del origen simbiótico del undulipodio.

Me parece que una manera de interpretar estos hechos es pensando que el sistema de movilidad de la célula eucariote posee su propia historia, distinta de la del resto de la célula, es decir, que tiene su origen en microorganismos simbióticos, cuyos componentes se han dispersado y tienen ahora nuevas funciones. La célula nucleada tiene, por lo tanto, su origen en la integración de simbiontes, formando una unidad más compleja.

### Se delinea el cuerpo

La existencia de ADN en mitocondrias y cloroplastos terminó con las dudas que revoloteaban alrededor del origen simbiótico de estos organelos. En el caso del undulipodio, la observación de ciertos paramecios, un grupo de proctocistas, ya permitía suponer la existencia de material genético en el cinetosoma. Hay algunos paramecios que presentan una anomalía en el nado, ya que en lugar de nadar en línea recta, estos organismos giran y se bambolean, dejando una traza anormal al nadar. Dicha anomalía se transmite de generación en generación, pero también de manera anormal. Los paramecios presentan una forma de sexualidad en la cual intercambian material genético de sus núcleos, y posteriormente se dividen. Si ocurre un intercambio genético entre un paramecio de nado anormal y uno normal, la anomalía sólo se presenta en la progenie del que tiene la anomalía, ignorando las leyes elementales de la heren-

cia. La explicación posible es la existencia de ADN fuera del núcleo, y su ubicación en el cinetosoma fue sugerida por las observaciones realizadas por genetistas que notaron que al emplear tinciones específicas para ADN, éstas coloreaban ciertas partes del cinetosoma.

La supuesta existencia de ADN en el cinetosoma ha causado mucha discusión, pero ahora existe una nueva evidencia. David Luck, John Hall y Zenta Ramanis, de la Rockefeller University, realizaron un experimento en *Chlamydomonas*, un alga verde unicelular que posee un gran cloroplasto y dos undulipodios, que parece confirmar este supuesto. El organismo se somete a múltiples mutaciones que truncan uno de sus undulipodios, disminuyendo su capacidad de nadar. Dos *Chlamydomonas* sexualmente activas se fusionan y producen células diploides, es decir, con el doble de material genético, las que, después de recombinarlo, se dividen formando células normales, haploides, dividiendo también su ADN en dos.

Lo primero que se dedujo fue que los genes mutantes se encontraban con seguridad en un mismo trozo de ADN. Así que Luck y su equipo desarrollaron una sonda para detectar este trozo de ADN, que acoplaron a un marcador fluorescente, y lo aplicaron a células de *Chlamydomonas*. El resultado fue claro: dos zonas se marcaron indicando la existencia de grandes cantidades de ADN fuera del núcleo, en la base de cada undulipodio, en donde se encuentran los cinetosomas.

Si estos resultados son corroborados, se comprobaría que este ADN es el vestigio de la bacteria que dio origen al undulipodio por simbiosis, un trazo que delata al gato.

### ¿Tiene cola el gato?

La última incógnita sería la identidad del simbionte que dio origen a los órganos de movilidad de las células eucariontes.

A mi me parece que el ancestro más apropiado es una espiroqueta. Las espiroquetas son un gran grupo de diversas bacterias cuyo rasgo característico es el movimiento (ver figura). Son las más rápidas del microcosmos, tienden a pegarse a las cosas —estén o no vivas— y cuando nadan una junto a otra, lo hacen moviéndose al unísono, simplemente por encontrarse cerca. Hay espiroquetas que se alimentan sobre la superficie de su hospedero y que lo impulsan con su mo-

vimiento ondulatorio, confiriéndole así una propulsión de la cual carece.

Es seguro que en sus inicios, la unión de una bacteria como *Thermoplasma* con una espiroqueta proporcionó ciertas ventajas a ambas. Durante épocas de desecación la posibilidad de moverse hacia lugares en donde hay agua es una ventaja. La selección natural debe de haber favorecido este tipo de alianzas. De hecho, actualmente hay amebas que cuando la comida abunda en su entorno, retraen su undulipodio, y cuando ésta escasea, lo hacen crecer para nadar y poder buscar comida.

*Treponema* es una espiroqueta que se asocia con *Mixotricha paradoxa*, un protista que vive en el intestino de las termitas, que posee cuatro undulipodios que sólo le sirven como timón, pues su movimiento lo debe a las 500 000 espiroquetas que se encuentran pegadas a su superfi-

cie. Sin *M. paradoxa* y los otros protistas que digieren la madera, las termitas morirían, ya que son incapaces de degradar la celulosa. Sin las espiroquetas, este protista no podría moverse. Estas cadenas de simbiosis son frecuentes entre los seres vivos.

Algunas espiroquetas poseen microtúbulos, aunque hasta ahora no se les ha encontrado ordenados con el patrón  $9(2) + 2$ . La manera en que las células integran en su interior los microtúbulos de las espiroquetas y construyeron a partir de ellos un maravilloso aparato para organizar el movimiento, es uno de los más complejos rompecabezas por resolver. Los microtúbulos, como ya se mencionó, intervienen en el transporte intracelular de gránulos, en la secreción celular, en la formación del huso mitótico, en la división celular, son los causantes de la asimetría de las células nerviosas, etc. Su



John Tenniel

estructura interna común indica el mismo origen, el cual es de suponer que se debe a una simbiosis con una bacteria ancestral.

Si la capacidad de la célula eucarionte para moverse y reordenar su contenido resulta ser el legado de un microorganismo simbiote, los biólogos habrán obtenido una mayor y más profunda comprensión de la manera en que las células atravesaron el abismo evolutivo que existe entre las bacterias y los eucariontes. La adquisición de la movilidad, después de todo, debe de haber precedido la llegada de los cloroplastos y mitocondrias. Todas las células animales carecen de cloroplastos, y muchos protistas carecen incluso de mitocondrias, pero prácticamente no existe célula con núcleo que no tenga un sistema de movimiento basado en microtúbulos, casi siempre interno.

El concebir la célula eucarionte como una comunidad de microorganismos permite ver la biología celular bajo un nuevo enfoque. Por ejemplo, la diferenciación celular, es decir, el proceso de especialización de las células que ocurre en muchos organismos pluricelulares, el cual da origen, entre muchas otras cosas, a la formación del músculo celular rico en mitocondrias, a la del espermatozoide humano con su undulipodio, o a la de una célula fotosintética con sus cloroplastos, puede ser entendido como el crecimiento diferencial de uno u otro de los componentes microbianos.

Asimismo es posible acercarse al origen de los organismos pluricelulares. Como ya vimos, el cinetosoma es lo mismo que el centriolo, y se ha observado que son excluyentes en el tiempo, es decir, que cuando ocurre la mitosis, hay organismos que absorben el undulipodio, y cuando éste se encuentra presente, no hay mitosis. Algunos organismos, como los hongos y las algas rojas, han eliminado por completo el undulipodio, conservando la mitosis, mientras que las células gaméticas de los animales, por ejemplo, mantuvieron el undulipodio, perdiendo para siempre la capacidad de dividirse. La solución intermedia es la cíclica, es decir, la conservación de ambas desfasadas en el tiempo. Sin embargo, esta solución parece llevar como condena la condición de unicelularidad, ya que la mayoría de los organismos que la adoptaron son unicelulares.

Tal vez después de mucho tiempo, durante el cual aparecieron muchas y muy diversas soluciones, emergió un organis-



John Tenniel

mo capaz de mantener las dos opciones simultáneamente: un organismo que en una célula poseía un undulipodio y preservaba otra célula unida a la primera, la cual podía seguirse dividiendo. Ambas células eran propulsadas por el undulipodio. Esta innovación abrió el camino a toda una serie de niveles de complejidad estructural. Los organismos que poseen una célula germinal y un cuerpo o soma, es decir, una célula cuya única función es la reproducción, y un cuerpo multicelular altamente diferenciado para múltiples y variadas funciones, han evolucionado de aquí. Esta es la estructura básica de nuestros cuerpos, pues en ellos existen células germinales, espermatozoides y óvulos, que son las únicas capaces de reproducir un ser humano, a pesar de que todas las células de nuestro cuerpo probablemente contienen una copia completa de todos nuestros genes.

### Los tres pies del gato

En la lista de los organelos que provienen de simbiosis está establecido que los plástidos vienen de las cianobacterias, probablemente de diversas especies de ellas, por lo que son organelos de origen polifilético. Las mitocondrias, que vienen de algunas "protobacterias" tipo eubacterias, tienen al menos dos orígenes, por lo que también son polifiléticas. Asimismo se ha comprobado que algunos endosimbiontes del grupo de los paramecios, como las partículas kappa (*Caedibacter*), género que debe a su vez su actividad a un virus bacteriano que llevan dentro, tienen un origen simbiótico. Se calcula que el géne-

ro *Paramecium* contiene asociadas cerca de 200 bacterias diferentes, tanto en el citoplasma como dentro del núcleo.

Pero existen varios organelos que aún siguen provocando discusión, como los hidrogenosomas, que son estructuras que producen hidrógeno, que miden un micrón, y están rodeadas por una membrana. Estos se encuentran en ciertos protistas, como *Trichomonas*, y en *Plagiopyla*, y poseen un metabolismo de piruvato muy similar al de los clostridia, esto es, con metabolitos de tres carbonos. No se ha detectado ADN en ellos, por lo que la hipótesis de que tienen su origen en bacterias anaerobias fermentadoras y evolucionaron por un proceso de simbiogénesis sigue en debate. También existen los peroxisomas —cuyo equivalente en plantas son los glioxisomas—, que se ha visto se dividen por bipartición, y que Christian de Duve sugiere en su libro *Blueprint for a Cell*, que se trata de antiguas eubacterias que también tienen su origen en una simbiosis.

Tanto el caso de los hidrogenosomas como el de los peroxisomas y el de los undulipodios no se han probado por completo, pero existen las suficientes evidencias para suponer que tienen su origen en una simbiosis. Sin embargo, hay una serie de organelos que parece poco probable que deban su origen a una simbiosis, como son el retículo endoplásmico, el aparato de Golgi, el núcleo, el flagelo rotatorio y el ribosoma, para los cuales nadie ha aportado pruebas para demostrar su origen simbiótico. Ello demuestra que los organelos pueden o no ser de origen simbiótico... y que tal vez no hay que buscarle tres pies al gato.

En la reconstrucción de estas historias evolutivas hace falta aún mucha investigación. Es necesario realizar estudios detallados que nos permitan decidir si se trata o no de casos de simbiosis. La paradójica relación entre las evidencias y la simbiogénesis imprime a este tipo de reconstrucción una dinámica particular. El rasgo más insignificante puede ser una evidencia. Después de todo, en la vida muchas cosas empiezan con sólo una sonrisa. ♦

Agradecemos la colaboración de Antonio Lazcano A., quien hizo posible la asistencia a esta conferencia, la realización de una entrevista con Lynn Margulis (de próxima aparición en CIENCIAS), y la visita al laboratorio de Stanley Miller. También le agradecemos la revisión del texto y algunas de las imágenes que lo ilustran.