

"Any man who believes in God must realize that no scientific fact, as long as it is true, can contradict God."¹

«*La vida es un río.*» «*Nuestras vidas son los ríos que van a dar en la mar, que es el morir.*» Estas tan conocidas y meditadas imágenes poéticas, flúidas y frescas como el agua corriente, y eternamente jóvenes como la vida misma, merecen por su hermosura y contenido servir de preámbulo a nuestro árido artículo. Siendo la naturaleza maravilla de encantos y prodigios, es explicable que los científicos que tratan de explorar sus senderos ocultos y revelar sus misterios gusten a menudo, sin olvidar la seriedad y el rigor que la Ciencia exige, de soñar y ensayar representaciones artísticas menos graves y más bellas e ilustrativas. En verdad, la misma Ciencia admite que la imaginación y la intuición son más brillantes, sugerentes y rápidas que la experimentación y el raciocinio, y no necesaria y completamente engañosas. El biólogo no sólo estudia la vida, sino que, como hombre enamorado de ella, se entusiasma y extasía al contemplar la perfec-

ción admirable que la enaltece. Quizás actualmente sea el biólogo, entre los científicos, el más idealista y escrupuloso, y el menos petulante y engreído. La Historia le ha enseñado a no ser tímida y ciegamente crédulo, ni fanática y altivamente incrédulo; sus experiencias y observaciones, sin duda las de más trascendencia para el género humano, van siempre adornadas del respeto, la prudencia y la humildad del que, consciente de su pequeñez e ignorancia ante la grandeza y sabiduría del mundo que investiga, ha de aprender y descubrir más que adoctrinar y crear.

Cuando en nuestro mundo hablamos de vida y muerte, individualizamos, porque la vida en sí, considerada en su conjunto, fluye, evoluciona y se renueva sin cesar desde que en un principio fue creada, probablemente sin interrupciones ni baches, excepto quizá en los balbuceos de sus primeros intentos. La vida anima desde entonces el Uni-

1. P. LECOMTE DU NOÛY, *Human Destiny*, Nueva York, The New Ameri-

can Library of World Literature Inc., 1958, págs. 170 y 189.

verso y la materia que la sustenta, integrada por los elementos biogénicos (principalmente carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno y, en menor escala, fósforo y azufre) muda sin reposo, cerrando un fantástico ciclo, del estado vivo al estado muerto y viceversa. Los ciclos que los bioelementos describen al pasar la materia organizada a materia inerte y esta, otra vez, a aquella se engranan e integran unos con otros y giran armónica y ordenadamente a través de los tiempos sin comienzo ni fin. Así, por ejemplo, el anhídrido carbónico, atmosférico y disuelto en las aguas, se fija fotosintéticamente, a razón de 200.000 millones de toneladas de carbono por año, y se renueva por respiración y combustión cada 300 años, mientras que el oxígeno de la atmósfera se libera y consume en sentido inverso durante los mismos procesos cada 2.000 años. La naturaleza cíclica de muchos fenómenos biológicos es una expresión tangible del ritmo de la vida, de su dinámica, continuidad y poder de renovación. También la vida de los ríos es un constante cíclico fluir, porque si bien es cierto que mueren en el mar, no lo es menos que renacen de continuo, perennemente vivificados, de sus manantiales, las nubes y las nieves.

Estructura y función, inestabilidad y organización, herencia y variación son quizás las características más fundamentales de la vida. En consecuencia, y como analizaremos más adelante, no puede haber vida

sin intercambio constante de materia y energía, sin consumo continuo de fuentes materiales y energéticas que la sostengan y sustenten. En la actualidad, y en nuestro planeta, la luz solar es, en último término, la fuente energética de toda vida. Maravillosa y eficientemente, la energía luminosa del sol, antes de degenerar en calor y enfriarse a la temperatura de la Tierra, es absorbida y transformada en energía química por las algas de los océanos y las plantas de los continentes, y utilizada después por los demás organismos no fotosintéticos para la síntesis de sus edificios celulares y el mantenimiento de la vitalidad que los caracteriza. También la Tierra es en cierto modo, como los seres vivos, un sistema termodinámicamente abierto, en el que la energía calorífica del Sol, que mantiene el ciclo de las aguas, se transforma en energía mecánica y puede alimentar las centrales hidroeléctricas.

/

I

¿QUÉ ES LA VIDA?

¿Qué es la vida? ¿Cuándo, dónde, cómo y por qué empezó a haber vida? Estas incógnitas, que han intrigado al hombre desde la más remota antigüedad, pueden hoy, al menos algunas de ellas, ser parcialmente respondidas con un criterio científico serio. Pero no nos enga-

ñemos, aunque la Biología haya avanzado vertiginosamente durante el último siglo, es más lo que queda por andar que lo andado, y son también más cruciales las preguntas sin respuestas que las ya resueltas.

Para tratar de solucionar problemas tan complicados como los que plantea la vida en sus diversos aspectos, los biólogos han tenido que usar como táctica analítica la simplicidad, y al mismo tiempo admitir que cualquier fenómeno simple descubierto es solo una faceta del complejo mosaico en que está integrado. La Biología es una ciencia peculiar entre las demás Ciencias que, a diferencia de la Física y la Química, solo se interesa por la materia cuando esta ha adquirido ciertas propiedades esenciales y singulares. La materia existe en una jerarquía de estados de organización: partículas elementales, átomos, moléculas, agregados moleculares, orgánulos celulares, células, tejidos, órganos, organismos pluricelulares, sociedades vegetales y animales. Cada paso en esta escala ascendente introduce un nuevo grado de complejidad y, en consecuencia, nuevas leyes que no son observables a niveles más inferiores. Y es precisamente a partir de un cierto grado de complejidad no perfectamente definido cuando la materia adquiere el conjunto de propiedades que caracterizan a los organismos que llamamos vivos. ¿Cuáles y cuántas de estas propiedades son necesarias y suficientes

para considerar vivo a un sistema? Es indudable que, existiendo un gradiente de transición más bien que una frontera nítida de separación entre la materia muerta y la viva, la respuesta ha de ser no menos difícil que ambigua y arbitraria. Los científicos usarán, según sus puntos de vista, términos y conceptos dispares que les llevarán a definiciones particulares, imperfectas e incompletas. Para unos, la facultad más esencial del ser vivo será la de reproducirse a sí mismo y, en cierto grado, mutar; para otros, la de sintetizar sus estructuras celulares utilizando distintas fuentes de materia y energía; para estos, la de llevar a cabo un sinnúmero de reacciones enzimáticas específicas, perfectamente controladas; para aquellos, la irritabilidad, etc. Las dificultades inevitables e insolubles que surgen al tratar de precisar las diferencias que separan a los seres más primitivos y rudimentarios de los sistemas muertos desaparecen, lógicamente, a medida que se asciende en la escala biológica a niveles más superiores y se van agregando y potenciando progresivamente las propiedades que definen a los seres más organizados. Los biólogos actuales han llegado a la prudente y objetiva conclusión de que es más importante y efectivo profundizar, poco a poco, en el conocimiento formal de los misterios de la vida, en su naturaleza, origen y evolución, que especular y tratar de definirla.

II

EVOLUCIÓN QUÍMICA
Y ORIGEN DE LA VIDA

A comienzos de la segunda mitad del siglo pasado, dos gigantes de la Biología hicieron tambalearse en sus cimientos dos teorías que, hasta entonces, habían sido admitidas como hechos evidentes por la mayoría de los científicos: la generación espontánea y la fijeza de las especies. Pasteur demostró, con simples y elegantes experimentos, que la vida, en forma de seres organizados, no nace *de novo* en las condiciones actuales de nuestro mundo, y Darwin dedujo de sus observaciones que los organismos más complicados que hoy lo habitan proceden por evolución de otros más sencillos que les precedieron. Para los que a menudo, con buena o mala fe, tratan de mezclar lo humano con lo divino y sacar las cosas de quicio, no deja de ser instructivo el que la doctrina de la generación espontánea, calurosamente defendida por el jesuita inglés Needham, y ferozmente atacada por otro clérigo, el italiano Spallanzani, fuese finalmente abatida por el ferviente y profundo católico francés, Pasteur.

Aunque con frecuencia se afirma que los descubrimientos de Pasteur demostraron la imposibilidad de toda generación espontánea, pasada, presente o futura, esta conclusión es mucho más exagerada y ambiciosa de lo que, en rigor, permiten sus

experimentos, realizados en condiciones muy particulares y limitadas. Nadie puede hoy seriamente negar la posibilidad de biogénesis en las condiciones adecuadas de tiempo y ambiente que debieron darse al comienzo de la Historia de nuestro planeta. Por otro lado, hay que tener bien presente que los cambios químicos y biológicos, que como consecuencia de la aparición de la vida en la Tierra han tenido lugar en la superficie de esta, han modificado de tal manera sus condiciones, que hoy puede ser imposible lo que al principio no lo fue. El propio Darwin se vio filosóficamente forzado a creer en la generación espontánea de la materia viva en sus orígenes, al extrapolar hacia atrás sus conceptos básicos sobre la evolución, y lo hizo constar así en una de sus cartas: «Se dice frecuentemente que todas las condiciones necesarias para la producción primera de un organismo vivo prevalecen en la actualidad. Pero si (y ¡oh! qué gran sí) pudiéramos concebir que en nuestros días se formase químicamente en algún estanque con toda clase de fosfatos y sales amónicas, luz, calor, electricidad, etc., un compuesto proteico susceptible de cambios todavía más complejos, tal materia sería instantáneamente devorada o absorbida, cosa que no habría ocurrido antes de que los organismos vivos existiesen»².

2. F. DARWIN, *The Life and Letters of Charles Darwin*, Nueva York, Appleton, 1898, t. 2, pág. 202.

Estos simples conceptos, enjuiciados por Darwin en 1871, constituyen, en esencia, la base de la teoría moderna del origen de la vida, redescubierta, por decirlo así, y desarrollada en nuestros días por el ruso Oparin ³ y el inglés Haldane ⁴. Hoy se admite ⁵ que nuestra Tierra se formó a temperatura relativamente baja por agregación de polvo cósmico hace unos 4.500 millones de años, y que su atmósfera fue, en un principio, muy reductora y distinta de la actual; esta, como es sabido, es oxidante y se compone fundamentalmente de nitrógeno y oxígeno, junto con cantidades relativamente pequeñas de otros gases. En la atmósfera primitiva, los elementos hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y carbono, que después habrían de ser los principales constituyentes de la materia viva, debieron estar presentes en su forma reducida, esto es, como hidrógeno molecular, agua, amoníaco y metano. Según se cree, al reaccionar estas sustancias entre sí, por la acción de descargas eléctricas, rayos ultravioletas y radiaciones ionizantes, se formó, en las capas superficiales, una rica «sopa» de materia orgánica,

con potencialidad suficiente para originar moléculas cada vez más complicadas y agregados moleculares de organización superior. De este modo parece ser que se inició, hace 3.000 millones de años, la evolución química, que a lo largo de unos 500 millones de años acabaría dando lugar a la aparición de los primeros sistemas celulares. Recientemente se ha logrado la síntesis abiótica en condiciones prebiológicas de los constituyentes más característicos de las células. El experimento clásico, que abrió la serie, fue realizado en 1953, en el laboratorio del profesor Urey, de la Universidad de Chicago, por el entonces estudiante Stanley L. Miller, al conseguir la síntesis de aminoácidos por la acción de una descarga eléctrica sobre una mezcla gaseosa de hidrógeno, agua, amoníaco y metano ⁶. Con posterioridad, el español Oro consiguió la síntesis de monosacáridos, bases púricas y pirimídicas; Ponnampereuma, la de adenosina, AMP, ADP y ATP; Schramm, la de moléculas gigantes, de ácidos nucleicos; y Fox, la de proteínoides (altos polímeros peptídicos de aminoácidos) ⁷.

3. A. I. OPARIN, *The Origin of Life*, Nueva York, Dover Publications Inc., 1953.

4. J. B. S. HALDANE, *Collection of Essays on The Origin of Life*, Londres, Penguin Books, 1957.

5. M. y G. J. CALVIN, *Atom to Adam*, "American Scientist" 52 (1964) 163; y R. Y. STANIER, M. DOUDOROFF y E. A.

ADELBERG, *El mundo de los microbios*, Madrid, Aguilar, 1965, pág. 55.

6. S. L. MILLER, *The Origin of Life*; en *This is Life*, Nueva York, Holt, Rinehart and Winston, 1962, pág. 317.

7. *The Origins of Prebiological Systems*, editado por S. FOX, Nueva York, Academic Press, 1965.

III

EVOLUCIÓN BIOLÓGICA

Según los cálculos actuales, la evolución biológica está en marcha en la Tierra desde hace unos 2.500 millones de años. Sin embargo, como los primeros organismos, por ser muy delicados y pequeños, y no poseer partes duras, no dejaron huellas fácilmente reconocibles en las rocas, la forma fósil más antigua que se conoce, un alga microscópica verde azulada, es más reciente, y data de unos 2.000 millones de años. La evidencia histórica directa, suministrada por los fósiles del Cámbrico, indica que a comienzos de este período, es decir, hace unos 500 millones de años, habían ya aparecido sobre la Tierra los principales grupos biológicos que hoy la habitan. En los períodos postcámbricos, los mayores acontecimientos de la evolución fueron la conquista de las áreas continentales por casi todos los troncos animales y las plantas, y la aparición de los vertebrados y plantas superiores. Es decir, durante las eras Paleozoica, Mesozoica y Cenozoica, que en su conjunto comprenden aproximadamente un quinto del tiempo total de la evolución biológica, aparecieron pocos modelos de organización enteramente nuevos,

como si después del Cámbrico hubieran cesado la imaginación e inventiva que hasta entonces habían caracterizado al proceso evolutivo.

Desde el punto de vista energético, la evolución de los organismos es también fascinante. Las formas más primitivas fueron, indudablemente, anaerobias, y su metabolismo fermentativo tuvo necesariamente que depender de la presencia en el «caldo» en que vivían de sustancias orgánicas, las cuales, más pronto o más tarde, acabarían por agotarse. Para que la vida pudiese continuar sobre la Tierra era, pues, necesario que los organismos aprendiesen a utilizar otras fuentes energéticas. El salto evolutivo crucial tuvo lugar cuando aparecieron los primeros organismos fotosintéticos, que, habiendo sintetizado clorofilas, pudieron convertir la energía luminosa del Sol en energía química. Al principio, no debió ser fundamental el que la fotosíntesis fuese del tipo que realizan las plantas verdes, ligada a la asimilación del anhídrido carbónico y al desprendimiento de oxígeno, sino que bastaría con otra mucho más simple, idéntica o parecida a la que hoy podemos observar en las bacterias fotosintéticas⁸, reliquias vivientes de tiempos muy remotos; pero, después, al irse consumiendo las reservas de compues-

8. M. LOSADA, A. V. TREBST, S. OGATA y D. I. ARNON, *Equivalence of Light and Adenosine Triphosphate in Bacterial Photosynthesis*, "Nature" 186 (1960) 753; y ARNON, LOSADA, M. NO-

ZAKI y K. TAGAWA, *Photoproduction of Hydrogen, Photofixation of Nitrogen and a unified Concept of Photosynthesis*, "Nature" 190 (1961) 601.

tos reductores (hidrógeno, derivados azufrados, ácidos orgánicos, etc.) e irse cargando la atmósfera de anhídrido carbónico, debió hacerse indispensable el desarrollo de un nuevo tipo de metabolismo para fijar ese anhídrido carbónico mediante un compuesto reductor que no se agotase. El agua, el sustrato biológico por excelencia, era abundante, pero no podía suministrar hidrógenos (electrones) directamente por ser de por sí muy mal reductor. Había, sin embargo, una posibilidad de solución para este nuevo obstáculo: que los electrones del agua pasasen a un nivel más reducido al ser excitados por la luz del Sol absorbida por la clorofila. Este maravilloso salto evolutivo, decisivo en la historia de la biología y de la humanidad, ocurrió cuando las algas adquirieron una nueva y adicional reacción fotosintética que no poseían las bacterias: la fotooxidación del agua por la clorofila activada⁹. Al liberarse el oxígeno del agua y acumularse en la atmósfera, se formó, por la acción (¡ también fotoquímica !) de los rayos solares, una capa de ozono a una altura de 22 a 25 kilómetros. Este manto de ozono, fuertemente absorbente a 320 milimicras y prácticamente opaco por debajo de 290 milimicras, impidió la llegada de radiaciones antibióticas a los estratos bajos de la atmósfera y permitió, en consecuencia, que los seres vivos emer-

gieran de las aguas e invadieran la tierra. La formación fotosintética de oxígeno, por un lado, y de sustancias orgánicas, por otro, hizo entonces posible la aparición y posterior evolución de los organismos aerobios. La luz del Sol, por tanto, no solo ha alimentado a los organismos desde casi sus comienzos, sino que ha hecho posible su posterior evolución. En realidad, y puesto que la energía solar procede de reacciones nucleares, debiéramos decir que ha sido la energía atómica, un descubrimiento tan reciente, la que ha venido sosteniendo e impulsando al mundo vivo desde hace miles de millones de años.

IV

EVOLUCIÓN HUMANA

Es evidente que las leyes físicas, químicas y biológicas que rigen en el Universo, siguiendo un plan tan ordenado y maravilloso que ni los mismos ateos tendrían graves reparos en llamar divino, han intervenido desde los comienzos de la Historia de la Tierra en la evolución química, si es que esta, efectivamente, tuvo lugar, y en la evolución biológica, que ha culminado en la creación del hombre. Pero la vida humana no se rige únicamente por leyes biofísicoquímicas, sino por otras mucho más elevadas y escon-

9. LOSADA, F. R. WHATLEY Y ARNON, *Separation of two Light Reactions in*

noncyclic Photophosphorylation of green Plants, "Nature" 190 (1961) 606.

didadas, que algunos niegan o admiten solo como normas. En los tiempos en que se nos ha dado vivir hemos de tener conciencia de que si bien en el pasado la evolución biológica ha sido fundamentalmente pasiva, en el futuro puede, con nuestro concurso, ser noble y sabiamente activa, si justa y prudentemente bienusamos de los poderes y la libertad que Dios nos ha otorgado como reyes creados a su imagen y semejanza. Como ha escrito el gran físico Lecomte du Noüy en su maravilloso libro sobre *El destino humano*, «el más alto deber de cada hombre es contribuir lo mejor que pueda a esta nueva fase de la evolución. Cada hombre debe meditar en que el destino de la humanidad es incomparable y, sobre todo, no olvidar que la chispa divina está en él y solo en él, que él es libre de desatenderla, de apagarla, o de acercarse a Dios demostrándole su afán de trabajar con Él y para Él».

Yo creo que, en un mundo angustiado, extraviado y pesimista, en el que muchas almas fatigadas y ciegas luchan como náufragos buscando una paz y salvación en la que no creen, solo el científico que confía en Dios puede mirar con optimismo al futuro, como nos ha enseñado Teilhard de Chardin, porque, para él, las leyes que gobiernan el Universo, la vitalización de la materia y la hominización de la vida tienen una Causa y un Fin, y la fe, la esperanza y la caridad siguen siendo las más hermosas de las virtudes.

V

FUENTES DE ENERGÍA BIOLÓGICA

Las transformaciones metabólicas que realizan las células tienen por objeto: 1, obtener energía fisiológica de las fuentes energéticas de que se alimentan, sean estas físicas (luz) o químicas (nutrientes inorgánicos y orgánicos); y 2, fabricar compuestos orgánicos utilizables como sillares para la síntesis del material celular.

Los estudios de bioquímica comparada, iniciados en época relativamente reciente por Kluver y Donker¹⁰, han revelado la sorprendente unidad bioquímica que existe entre los seres vivos. A pesar de ser la bioquímica una ciencia tan joven, ya son más bien lejanos los tiempos en que se comentaba con perplejidad el hecho de que células aparentemente tan distintas en su función y organización como las de músculo y levadura transformasen los hidratos de carbono siguiendo vías metabólicas fundamentalmente idénticas. Como ha dicho ingeniosamente el gran biólogo Szent-Györgyi, desde un punto de vista bioquímico no hay realmente diferencias entre un rey y una col.

10. A. J. KLUYVER y H. J. L. DONKER, *Die Einheit in der Biochemie*, "Chemie Zelle Gewebe" 13 (1926) 134.

En una publicación reciente ¹¹ hemos creído oportuno clasificar los organismos en Quimioergónicos, Quimiofotoergónicos y Fotoergónicos, atendiendo a la naturaleza de las fuentes energéticas que utilizan. El motivo que nos ha llevado a agruparlos de este modo no ha sido un capricho, sino el convencimiento de que, como hemos dicho antes, los seres vivos no se diferencian fundamentalmente en las reacciones bioquímicas que llevan a cabo durante su metabolismo intermediario, sino, más bien, en los mecanismos fotosintéticos o quimiosintéticos que han desarrollado para captar y transformar la energía que precisan para vivir.

Los organismos quimioergónicos utilizan la energía química contenida en los compuestos que les sirven de alimentos. A este grupo pertenecen los seres más primitivos, como las bacterias, y los más evolucionados, como el hombre. Todos ellos obtienen la energía química que necesitan para sus reacciones endergónicas descomponiendo, mediante reacciones exergónicas de óxido-reducción de tipo fermentativo o respiratorio (aerobio o anaerobio), los sustratos que adquieren del medio externo. Los organismos fotoergónicos son las algas y las plantas superiores, que reciben toda su energía de la luz del Sol. Las bacterias fo-

tosintéticas verdes y purpúreas forman el grupo intermedio de los organismos quimiofotoergónicos, así llamados por aprovechar simultáneamente la luz y ciertas sustancias químicas como fuentes de energía.

Ya en 1886, Boltzmann ¹², uno de los fundadores de la Termodinámica, describió certeramente los conceptos básicos del metabolismo energético en los siguientes términos: «En el mundo vivo, la lucha universal por la existencia no es una lucha por materias primas, ya que todos los organismos pueden encontrar estas en abundancia en el aire, agua o suelo, sino una lucha por la entropía asequible en las transformaciones de energía del Sol caliente a la Tierra fría. Las plantas verdes extienden la enorme superficie de sus hojas para aprovechar al máximo este cambio, y convierten, por medio de procesos desconocidos, la energía del Sol, antes de que se enfríe a la temperatura de la Tierra, en energía química. Las síntesis químicas que tienen lugar son todavía un misterio en nuestros laboratorios, y los productos de estas cocinas químicas constituyen el botín por el cual pelea el mundo animal.»

En la actualidad, la vida en la Tierra depende realmente de la fotosíntesis, el proceso por el cual las plantas verdes transforman la energía luminosa del Sol en energía quí-

11. WHATLEY y LOSADA, *The photochemical Reactions of Photosynthesis*; en *Photophysiology*, Nueva York, Academic Press, 1964, t. 1, pág. 111.

12. L. BOLTZMANN, *Der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie*; en *Populäre Schriften*, Leipzig, Barth, 1905, pág. 39.

mica fisiológicamente útil. Si exceptuamos un pequeño grupo de bacterias quimiolitotrofas, que viven a expensas de la energía química contenida en ciertos compuestos minerales, todos los organismos se alimentan directa o indirectamente de la luz del Sol a través de las plantas, que la captan, transforman y distribuyen. Los seres vivos no contradicen el primer principio de la Termodinámica, pues, como ya concluyó el mismo Mayer¹³ en 1845, tres años después de enunciar dicho principio, «las plantas son capaces de absorber y convertir la energía pero no de crearla».

VI

ORDEN, DINAMISMO Y VIDA

Es evidente a todas luces que cualquier célula, órgano u organismo en actividad ha de consumir energía sea cual sea el tipo de trabajo que realice; la bacteria que mueve sus flagelos, el torpedo que produce electricidad, el corazón que late, la glándula que segrega, la luciérnaga que brilla, el pájaro que canta, el galgo que corre, etc. Pero, ¿y la célula en reposo, la célula que no crece ni se divide, ni se mueve, ni segrega, ni produce luz o electricidad, ni aparentemente efectúa tra-

bajo alguno? Pues también, porque solo puede conservar su integridad funcional, su estructura y organización a expensas de un consumo continuo de energía. La realidad es que no hay célula viva en reposo, en el verdadero y absoluto sentido de la palabra. La vida es cambio y exige para persistir que se mantenga el equilibrio dinámico, ordenado e inestable de reacciones anabólicas y catabólicas inherentes a ella, y cesa en cuanto estas se interrumpen y detienen. Se ha demostrado, sin embargo, que si se congela rápidamente una suspensión de células bacterianas, estas pueden permanecer en estado de «vida latente» durante largos períodos de tiempo a temperaturas tan bajas como las del aire líquido, a las que ninguna reacción metabólica puede tener lugar. Al pasar de nuevo a las condiciones normales, la vuelta a la vida activa de estas células paralizadas o dormidas más que muertas es ciertamente un despertamiento y no una resurrección.

Por ser el dinamismo condición inseparable de la vida, los organismos han de estar continuamente transformándose y deberían, en opinión de ciertos autores, degradarse progresivamente si obedeciesen el segundo principio de la Termodinámica, ya que la marcha hacia niveles más bajos, más estables y uniformes es una consecuencia de la ley general del aumento de entropía. En este sentido, el gran fisicoquímico

13. J. R. MAYER, *Die organische Bewegung*; en *Mechanik der Wärme*, Stuttgart, Cotta, 1874, pág. 54.

Lewis¹⁴, de la Universidad de California, en Berkeley, comentó extrañado la conducta anómala de los organismos vivos con las siguientes palabras: «Las criaturas hacen trampas en el juego de la Física y de la Química, porque solo ellas parecen ser capaces de afrontar la corriente de procesos aparentemente irreversibles. Estos procesos destruyen; los seres vivos construyen. Mientras el resto del mundo parece moverse hacia un nivel muerto de uniformidad, los organismos vivos producen sustancias nuevas y formas más intrincadas.» Afirmaciones como estas y otras análogas, en las que parece concluirse que los seres vivos van en contra de las leyes termodinámicas, solo serían ciertas si se tratase de sistemas aislados que no pudiesen intercambiar energía con su ambiente. Sin embargo, el examen cuidadoso de los hechos revela que los organismos no hacen trucos termodinámicos, pues si pueden mantenerse en un estado de equilibrio dinámico e inestable que tiende a deshacerse y derrumbarse y evitar el aumento de entropía que les conduciría inevitablemente al equilibrio estático y estable de la muerte es a expensas del intercambio de energía y materia que realizan con el medio externo. En las células vivas se están produciendo indudablemente, sin cesar, transformaciones que llevan consigo cambios de entropía, y que

pueden deberse a partículas o iones que se concentran y diluyen; a moléculas que se pliegan y despliegan, que se rompen y sintetizan, que se ordenan y desordenan; a compuestos que se hidratan y deshidratan, que se disuelven y cristalizan; a estructuras que se derrumban y reconstruyen, etc., pero hasta que no mueren el orden prevalece sobre el caos. En fin de cuentas, la organización que existe en los seres vivos es mantenida a expensas del orden contenido en la luz o en los alimentos químicos que continuamente consumen y destruyen.

Las células vivas trabajan a temperatura y presión más o menos constantes y no pueden usar calor como fuente de energía a la manera de las máquinas de vapor inventadas por el hombre, que requieren un salto de temperatura para transformar calor en trabajo. Como hemos dicho antes, la energía que precisan las células, sea simplemente para mantenerse vivas o para realizar una serie de trabajos diversos, procede directamente de la luz del Sol o de los alimentos con ella fabricados. Las transformaciones termodinámicas que ocurren en los seres vivos son comparables a las que tienen lugar en los sistemas químicos que reaccionan isotérmica e isobáricamente en condiciones en las que el calor puede fluir libremente hacia dentro o hacia fuera. En estas condiciones, cualquier cambio espontáneo del sistema va acompañado de una pérdida de energía libre,

14. G. N. LEWIS, *The Anatomy of Science*, New Haven, Yale University Press, 1926.

de acuerdo con la ecuación $\Delta F = \Delta H - T \Delta S$, donde ΔF , ΔH y ΔS son, respectivamente, los cambios de energía libre, entalpía y entropía del sistema que reacciona, y T la temperatura absoluta a la que se produce la reacción. ΔF y ΔH tienen, respectivamente, signo negativo en los procesos que liberan energía (exergónicos) o desprenden calor (exotérmicos), y positivo en los que requieren energía (endergónicos) o absorben calor (endotérmicos).

Si en los procesos celulares la tendencia es, pues, también siempre a que disminuya la energía libre, o lo que es lo mismo, a pasar de un estado más inestable a otro más estable, la ecuación anterior enseña que el aumento de entropía puede, de por sí solo, decidir el grado en que va a tener lugar una reacción exergónica. En general, sin embargo, como, en la mayoría de las transformaciones bioquímicas, el término $T \Delta S$ es pequeño en comparación con ΔF o ΔH , porque los compuestos que reaccionan y los productos de la reacción tienen forma y tamaño similares y sus concentraciones son análogas, el valor de ΔF está determinado principalmente por ΔH . Puesto que, cuando el cambio va acompañado de un aumento de entropía, el sistema se degrada al absorber del medio una cantidad de calor igual a $T \Delta S$, necesita, si ha de volver a su estado inicial, liberarse del aumento de en-

tropía sufrido; la energía $-T \Delta S$ que se ha de malgastar durante este proceso regenerativo para disminuir la entropía del sistema degradado a su valor inicial se elimina entonces al medio transformada en calor.

Como describiremos en detalle más adelante, la energía que se libera en los procesos exergónicos celulares es captada con relativa eficiencia (el resto se pierde como calor) mediante ingeniosos y delicados sistemas bioquímicos para impulsar cuando y donde convenga la marcha de muy diversas reacciones endergónicas. Puesto que el rendimiento de los procesos endergónicos tampoco es perfecto, una cantidad apreciable de la energía fisiológica que requieren se transforma también en calor sin ser utilizada. Los organismos se deshacen del aumento de entropía que lleva consigo esta producción de calor durante el metabolismo energético, expulsándolo al medio. El cambio de energía libre de una reacción determina su equilibrio —de modo que si se conoce la constante de este puede fácilmente calcularse aquel—, pero no la velocidad a la que transcurre. Así, por ejemplo, la combustión de la glucosa es un proceso muy exergónico que tiende naturalmente a producirse espontáneamente, pero que, de hecho, no ocurre en ausencia de catalizadores. Como todos sabemos, la oxidación de la glucosa es tan lenta en condiciones normales que puede mantenerse durante años en contacto con el

aire sin que se altere. En los sistemas biológicos son los enzimas los catalizadores encargados de disminuir la energía de activación de las reacciones, acelerando su velocidad y permitiendo que estas tengan lugar a temperaturas fisiológicas. El coeficiente de temperatura de las reacciones enzimáticas, al igual que el de las reacciones termoquímicas, es 2, es decir, su velocidad se dobla por cada 10 grados de aumento de la temperatura. Sin embargo, como los enzimas son muy sensibles a la inactivación térmica, ya que como proteínas se desnaturalizan por el calor, su actividad disminuye, en general, por encima de los 40°.

VII

FOTOSÍNTESIS Y RESPIRACIÓN COMO PROCESOS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA

El hecho de que los organismos fotoergónicos y quimioergónicos más evolucionados hayan desarrollado unos orgánulos citoplásmicos altamente diferenciados, llamados respectivamente cloroplastos y mitocondrias, para convertir la energía potencial contenida en la luz o en los alimentos en energía química fisiológica, refleja la importancia que las células conceden a sus funciones energéticas. Los cloroplastos y las

mitocondrias son, sin duda, las más importantes centrales transformadoras de energía de las células eucarióticas, donde se llevan a cabo, respectivamente, los procesos de fotosíntesis y respiración. Tanto la respiración como la fotosíntesis son fundamentalmente reacciones de óxido-reducción, en las que la energía liberada durante el transporte de electrones desde sistemas fuertemente reducidos a otros más oxidados es captada eficientemente como energía química por medio de mecanismos adecuados. No exageramos, pues, cuando decimos que uno de los caracteres más esenciales del estado viviente es, según frase del gran microbiólogo Kluyver¹⁵, la corriente continua y dirigida de electrones que tiene lugar en las células vivas. Para que las reacciones de óxido-reducción fluyan por sí mismas, es decir, para que sean exergónicas, es condición *sine qua non* que exista una diferencia de potencial mayor que cero entre los sistemas aceptores y donadores de electrones que reaccionan. La energía libre, ΔF , asequible cuando se oxida un mol de un compuesto reductor, viene expresada, en kilocalorías, por la ecuación $\Delta F = -23 \cdot n \cdot \Delta E$, donde ΔE es la diferencia de potencial, en voltios, entre los sistemas reaccionantes y n el número de electrones que cada

15. A. J. KLUYVER, *Microbial Metabolism; further Evidence for Life Unity; en The Microbe's Contribution to Bio-*

logy, Cambridge (Mass), Harvard University Press, 1956, pág. 71.

molécula de sustancia reductora cede cuando se oxida.

Los organismos quimioenergéticos se nutren de alimentos ricos en poder reductor, a los que, en general, quemamos dentro de las mitocondrias con el concurso del oxígeno molecular. Los fotoenergéticos, por el contrario, solo toman del medio nutrientes sin valor energético, es decir, oxidados al límite. En consecuencia, las mitocondrias pueden obtener, en la oscuridad, energía de los alimentos que reciben, mientras que los cloroplastos no. Los cloroplastos, en cambio, son capaces de generar ellos mismos, a expensas de la luz absorbida por la clorofila, diferencias de potencial equivalentes a las que adquieren las mitocondrias con sus alimentos; de este modo, pueden incluso romper el agua en sus dos elementos integrantes, oxígeno e hidrógeno. En el equilibrio actual del mundo vivo, las mitocondrias, que han sido evolutivamente posteriores a los cloroplastos, obtienen energía para la célula respirando los compuestos que estos generosamente sintetizan para ellas a expensas de la luz del Sol.

Aunque con frecuencia se comparan la respiración y la combustión, no puede olvidarse que difieren entre sí en varios aspectos fundamentales. La respiración consiste en una serie ordenada y controlada de reacciones enzimáticas exergónicas que tienen lugar en la célula en condiciones suaves y a la temperatura ordinaria, de modo que la energía liberada en

el proceso, al menos una parte considerable de la misma, sea atrapada bajo la forma de enlaces ricos en energía en vez de disiparse como calor. El concepto de enlaces ricos en energía, introducido por Lipmann¹⁶ en 1941, ha sido extraordinariamente fructífero para comprender cómo trabaja la maquinaria de la célula, pues permite explicar cómo se acoplan las reacciones exergónicas y endergónicas que en ella tienen lugar. La moneda energética de estas transacciones es el adenosintrifosfato o ATP, una sustancia química relativamente sencilla, caracterizada, entre otras cosas, por contener dos enlaces de pirofosfato ricos en energía, que en condiciones *standard* liberan o transfieren unas ocho kilocalorías por mol, cada uno, cuando se rompen o incorporan a otras moléculas. Algunos autores intentan recalcar la vital importancia de este compuesto en el metabolismo celular llamándole el secreto de la vida. La manera catalítica de actuar el ATP es en extremo interesante. Cuando la célula necesita energía para una reacción endergónica utiliza la contenida en el enlace terminal de pirofosfato del ATP, que se rompe en ADP (adenosin difosfato) y fosfato. La molécula de ADP así formada queda entonces en condiciones de recargarse por fosforilación acoplada a una reac-

16. F. LIPMANN, *Metabolic Generation and Utilization of Phosphate Bond Energy*, "Advan. Enzymol." 1 (1941) 99.

ción exergónica, transformándose de nuevo en ATP.

Siendo la glucosa el combustible por excelencia de los organismos quimioenergéticos y el producto más representativo de la asimilación del anhídrido carbónico por los fotoenergéticos, su metabolismo energético merece ser tratado, a modo de ejemplo, con algún detalle. Cuando la glucosa se quema a anhídrido carbónico y agua en un calorímetro, su calor de reacción, a 25°, es $\Delta H = -673$ kilocalorías/mol. Sin embargo, como la reacción va acompañada de un aumento de entropía,

$$\Delta S = \frac{15}{300} \text{ kilocal.}/\text{grado/mol},$$

se absorbe de los alrededores una cantidad de calor equivalente a $T \Delta S = 15$ kilocalorías, y la energía libre ΔF , o sea la cantidad máxima de energía asequible en el proceso, alcanza un valor de -688 kilocalorías/mol. La reacción inversa, o sea, la síntesis de un mol de glucosa a partir de anhídrido carbónico y agua, requiere, por tanto, un suministro de energía de 688 kilocalorías, de las cuales 15 se emplearán en disminuir la entropía del sistema a su valor inicial y serán expulsadas al medio como calor.

La oxidación aeróbica de la glucosa en la célula tiene lugar en tres

etapas principales, cada una compuesta de numerosos pasos enzimáticos. La primera o glucólisis es una fase preparatoria, en la que la hexosa se oxida parcialmente, rompiéndose en dos fragmentos tricarbónicos. La segunda consiste en la demolición de estos fragmentos, a través del llamado ciclo de Krebs o de los ácidos tricarbónicos, en anhídrido carbónico e hidrógeno (este último combinado principalmente con los piridín nucleótidos, los coenzimas más típicos de la óxido-reducción biológica). En la tercera y última fase, los doce moles de hidrógeno que suministra un mol de glucosa son oxidados a través de una cadena de pigmentos celulares o citocromos hasta combinarse finalmente con el oxígeno molecular para dar agua. Durante la respiración de la glucosa a través de estas tres fases se recuperan en total, como ATP, bajo la forma de 38 enlaces de pirofosfato, 304 kilocalorías por mol; es decir, el rendimiento del proceso llega a ser de cerca del 50 por 100. La transformación inversa, o sea la reducción del anhídrido carbónico por el agua, es, en cambio, una reacción endergónica, que las plantas pueden realizar a expensas de la luz solar. De acuerdo con los esquemas actuales de fotosíntesis¹⁷, se requieren del orden de 60 einstein de luz activa (1 einstein = 1 mol de quanta), o sea

17. ARNON, *Changing Concepts of Photosynthesis*, "Bull. Torrey Bot. Club" 88 (1961) 215; y LOSADA y ARNON, *Enzyme Systems in Photosynthesis*; en

Modern Methods of Plant Analysis, Berlin, Springer Verlag, 1964, t. 7, página 569.

unas 2.400 kilocalorías, para sintetizar el poder asimilatorio necesario según el ciclo de Calvin (12 moles de piridín nucleótido reducido y 18 moles de ATP) para la reducción a glucosa de seis moles de anhídrido carbónico. La eficiencia de este proceso asimilatorio, considerado en su conjunto, es, pues, de aproximadamente un 25 por 100. En general, en la célula, por razones energéticas, las rutas biosintéticas son más costosas que rentables las degradativas, es decir, la síntesis de un compuesto exige más energía fisiológica que la que este es capaz de rendir en su demolición.

Aunque la mayoría de los investigadores actuales estarían de acuerdo con los cálculos que acabamos de exponer, no podemos dejar de mencionar que las numerosas experiencias realizadas por el profesor Warburg¹⁸, uno de los pioneros más inventivos y fecundos en técnicas modernas de fotosíntesis y una de

las autoridades más sobresalientes en bioquímica, le han llevado a concluir que, en una naturaleza perfecta, la fotosíntesis es un proceso que transcurre con un rendimiento perfecto. En relación con la eficiencia de la fotosíntesis es también digno de ser comentado el hecho de que las clorofilas, los pigmentos fotosintéticos por excelencia, sean bastante ineficientes desde el punto de vista de utilización de la luz natural, ya que absorben fuertemente en el rojo y violeta y muy débilmente en el verde y verde-azulado, donde precisamente la energía de la luz solar que llega a la Tierra es máxima. En compensación, al hombre le ha sido dado vivir en un planeta afortunado porque casi el 75 por 100 de la energía radiante del Sol cae dentro de los límites espectrales que interesan en fotobiología, entre 300 y 1.100 milimicras.

18. O. H. WARBURG, *New Methods of Cell Physiology*, Nueva York, Interscience, 1962.
