

LOS DRAGONES DEL EDÉN

Especulaciones sobre la evolución
de la inteligencia humana

Carl Sagan

Traducción castellana de
Rafael Andreu

CRÍTICA
BARCELONA

El calendario cósmico

¿Qué otra cosa vislumbra
en la oscura lejanía, allá en el abismo del tiempo?

SHAKESPEARE, *La tempestad*

El mundo es viejísimo y el ser humano sumamente joven. Los acontecimientos relevantes de nuestras vidas se miden en años o fracciones de tiempo aún más pequeñas, en tanto que la duración de una vida humana se reduce a unos pocos decenios, el linaje familiar a unos cuantos siglos y los hechos que registra la historia a unos milenios. Y, sin embargo, se extiende a nuestras espaldas un fantástico panorama temporal que se pierde en un pasado remotísimo del que apenas sabemos nada. En primer lugar, porque no poseemos testimonios escritos, y en segundo lugar porque resulta muy difícil hacerse una idea de la inmensidad de los periodos involucrados.

Aun así hemos logrado fechar algunos hitos de este remoto pasado. La estratificación geológica y la fijación de cronología en base al empleo de métodos radiactivos aportan datos sobre las distintas etapas arqueológicas, paleontológicas y geológicas. La teoría astrofísica suministra información sobre la edad de los planetas, las estrellas y la galaxia de la Vía Láctea, así como una estimación del tiempo transcurrido desde que acaeció este trascendental suceso conocido como el *big bang*, es decir, la gigantesca explosión cósmica que afectó a toda la materia y la energía del universo. Quizás el *big bang* fuera el principio del universo, o puede que supusiera una discontinuidad que acabó con toda infor-

mación sobre los más remotos orígenes del cosmos. Pero lo indudable es que constituye el fenómeno más remoto del que se tiene noticia.

Para expresar la cronología cósmica nada más sugerente que comprimir los quince mil millones de años de vida que se asignan al universo (o, por lo menos, a su conformación actual desde que acaeciera el *big bang*) al intervalo de un solo año. Si tal hacemos, cada mil millones de años de la historia terrestre equivaldrían a unos veinticuatro días de este hipotético año cósmico, y un segundo del mismo correspondería a 475 revoluciones efectivas de la Tierra alrededor del Sol. En las páginas 23 a 25 presento la cronología cósmica de tres formas: una relación de fechas significativas anteriores al mes de diciembre; un calendario del mes de diciembre y una visión más pormenorizada de la Nochevieja, o sea del 31 de diciembre. Si se toma como base esta escala temporal, las efemérides narradas en los libros de historia —aun en aquellos que se esfuerzan en ampliar la visión de los hechos— se nos presentan tan apretujados que es necesario recurrir a una exposición detallada de los últimos segundos del año cósmico. Aun así, nos vemos obligados a reseñar como sucesos contemporáneos hechos que se nos ha enseñado a considerar muy distanciados en el tiempo. Es probable que en los anales de la vida se hayan producido acontecimientos igualmente cruciales en otros periodos, como, por ejemplo, entre las 10.02 y las 10.03 de la mañana del 6 de abril o del 16 de septiembre. Pero lo cierto es que tan sólo podemos ofrecer una visión pormenorizada del postrer intervalo del año cósmico.

La cronología se ha confeccionado de acuerdo con las pruebas más consistentes de que disponemos. No obstante, algunas resultan bastante inseguras. Por ello, nadie debe extrañarse si un día llega a determinarse que la vegetación no empezó a cubrir la superficie de la Tierra en el periodo silúrico, sino en el ordoviciense; o que los gusanos segmentados aparecieron en una fase del precámbrico más temprana de lo que se indica. Asimismo, es obvio que al confeccionar la cronología de los últimos diez segundos del año cósmico no me fue posible incluir todos los sucesos de relieve, y en este sentido espero que se me perdone el no haber mencionado de manera explícita los progresos acaecidos en el campo de las artes, la música, la literatura, o, en otro orden, las revoluciones americana, francesa, rusa y china, tan cargadas de significación histórica.

FECHAS ANTERIORES A DICIEMBRE

El <i>big bang</i> (la «gran explosión»)	1 de enero
Origen de la galaxia de la Vía Láctea	1 de mayo
Origen del sistema solar	9 de septiembre
Formación de la Tierra	14 de septiembre
Origen de la vida en la Tierra	~ 25 de septiembre
Formación de las rocas más antiguas conocidas	2 de octubre
Época de los fósiles más antiguos (bacterias y algas verdiazules)	9 de octubre
Diferenciación sexual (en los microorganismos)	~ 1 de noviembre
Plantas fotosintéticas fósiles más antiguas	12 de noviembre
Aparecen las eucariotas (primeras células con núcleo)	15 de noviembre
~ = fecha aproximada	

La elaboración de estas tablas y cuadros cronológicos inclina forzosamente a la humildad. Así, resulta desconcertante que la aparición de la Tierra como producto de la condensación de la materia interestelar no acaezca en este año cósmico hasta primeros de septiembre; que los dinosaurios aparezcan en Nochebuena; que las flores no broten hasta el 28 de diciembre o que el ser humano no haga acto de presencia hasta las 22.30 de la víspera de Año Nuevo. La historia escrita ocupa los últimos diez segundos del 31 de diciembre, y el espacio transcurrido desde el ocaso del Medioevo hasta la época contemporánea es de poco más de un segundo. En virtud de la convención adoptada, se supone que el primer año cósmico acaba de tocar a su fin.

Pero, a pesar del intervalo insignificante que nos corresponde en la tabulación cósmica del tiempo, es obvio que lo que vaya a ocurrir en la Tierra y en su entorno al iniciarse el segundo año cósmico, dependerá en buena medida del nivel que alcance la ciencia y de la sensibilidad del género humano en su más prístina manifestación.

CALENDARIO CÓSMICO DICIEMBRE

DOMINGO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO
	1 Formación de una atmósfera apreciable de oxígeno en la Tierra.	2	3	4	5 Formación extensiva de álveos y masas volcánicas en Marte.	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16 Primeros gusanos.	17 Fin del precámbrico. Inicio de la era paleozoica y del periodo cámbrico. Aparecen los invertebrados.	18 Primer plancton marino. Aparecen los trilobites.	19 Periodo ordoviciese. Primeros peces. Aparecen los vertebrados.	20 Periodo silúrico. Primeras plantas vasculares. La vegetación empieza a cubrir el suelo.
21 Comienzo del periodo devónico. Primeros insectos. Los animales empiezan a poblar la Tierra.	22 Aparecen los primeros anfibios. Primeros insectos alados.	23 Periodo carbonífero. Primera flora arbórea. Aparecen los reptiles.	24 Periodo permiano. Primeros dinosaurios.	25 Fin de la era paleozoica. Se inicia el mesozoico.	26 Periodo triásico. Aparición de los mamíferos.	27 Periodo jurásico. Aparición de las aves.
28 Periodo cretáceo. Primeras flores. Se extingue el dinosaurio.	29 Era mesozoica. Empieza la era cenozoica y el terciario. Primeros cetáceos y primates.	30 Primera evolución de los lóbulos frontales del cerebro de los primates. Primeros homínidos. Aparición de los grandes mamíferos.	31 Fin del plioceno. Periodo cuaternario (pleistoceno y holoceno). Aparición del primer hombre.			

EL CALENDARIO CÓSMICO

31 de diciembre

Origen del <i>Proconsul</i> y del <i>Ramapithecus</i> , probables ascendientes del simio y del hombre	~ 13.30
Aparición del primer hombre	~ 22.30
Uso generalizado de los útiles de piedra	23.00
El hombre de Pekín aprende a servirse del fuego	23.46
Empieza el último periodo glaciár	23.56
Pueblos navegantes colonizan Australia	23.58
Florece el arte rupestre en toda Europa	23.59
Invención de la agricultura	23.59.20
Cultura neolítica. Primeros poblados	23.59.35
Primeras dinastías en Sumer, Ebla y Egipto.	
Grandes avances de la astronomía	23.59.50
Invención del alfabeto. Imperio acadio. Babilonia y los códigos de Hammurabi. Egipto: Imperio Medio	23.59.52
Metalurgia del bronce. Cultura micénica. Guerra de Troya. Cultura olmeca. Invención de la brújula	23.59.53
Metalurgia del hierro. Primer Imperio asirio. Reino de Israel. Los fenicios fundan Cartago	23.59.54
La India de Asoka. China: dinastía Chi'n. La Atenas de Pericles. Nacimiento de Buda	23.59.55
Geometría euclidiana. Física de Arquímedes. Astronomía ptolemaica. Imperio romano. Nacimiento de Jesucristo	23.59.56
La aritmética india introduce el número cero y los decimales. Caída de Roma. Conquistas musulmanas	23.59.57
Civilización maya. China: dinastía Sung. Imperio bizantino. Invasión mongólica. Las Cruzadas	23.59.58
La Europa del Renacimiento. Viajes de descubrimiento de los países europeos y de la dinastía china de los Ming. La ciencia y el método empírico	23.59.59
Formidable expansión de la ciencia y de la tecnología. Universalización de la cultura. Adquisición de los medios de autodestrucción de la especie humana. Primeros pasos en la exploración planetaria mediante vehículos espaciales y en la búsqueda de seres inteligentes en el espacio extraterrestre	Tiempo presente: Primer segundo del Año Nuevo

Genes y cerebros

¿Con qué martillo? ¿Con qué cadena?
 ¿En qué horno se ha fundido tu cerebro?
 ¿Con qué yunque? ¿A qué temible garra
 sus atroces angustias le impulsaron a sujetarse?

WILLIAM BLAKE, «El Tigre»

De todos los animales, el hombre es el que tiene el
 cerebro más grande en proporción a su tamaño.

ARISTÓTELES, *De las partes de los animales*

La evolución biológica ha venido acompañada de un incremento de la complejidad. Los organismos más perfeccionados hoy existentes en la Tierra contienen un caudal de información, tanto genética como extragenética, mucho mayor que la de los más complejos organismos de, pongamos por caso, doscientos millones de años atrás, cifra que supone tan sólo la vigésima parte de la historia de la vida en nuestro planeta, o cinco días atrás, si tomamos como base el calendario cósmico. Los organismos actuales más simples tienen un pasado evolutivo tan denso como los de mayor complejidad, aunque bien pudiera ser que la bioquímica interna de las bacterias contemporáneas sea más eficiente que la de las bacterias de hace tres mil millones de años. En cambio, es probable que el monto de información genética de las actuales bacterias no sea mucho mayor que el de sus antecesoras. Así pues, es sumamente importante distinguir entre el caudal de información y la calidad de dicha información.

Llamamos taxones a las distintas formas biológicas. Las clasificaciones taxonómicas más genéricas distinguen entre plantas y animales, o entre organismos cuyas células tienen un núcleo muy poco desarrollado (por ejemplo, bacterias y algas verdiazules) y aquellos en los que el núcleo se presenta claramente diferenciado y posee una compleja estructura (caso de los protozoos y del hombre). Sin embargo, todos los organismos del planeta, tanto si tienen o no un núcleo definido, poseen cromosomas, en los que se almacena el material genético transmitido de generación en generación. Las moléculas transmisoras de los caracteres hereditarios son, en todo los organismos, los ácidos nucleicos. Salvo contadas excepciones, por lo demás secundarias, el ácido nucleico depositario de la información hereditaria es la molécula llamada ADN (ácido desoxirribonucleico). También cabe conceptuar como entidades taxonómicas diferenciadas otras divisiones más finas de varios tipos de plantas y animales en especies, subespecies y razas.

Una especie es un grupo de individuos que pueden cruzarse dando descendencia fértil, situación que no se produce al cruzarse con organismos de otros grupos. El cruce de perros de distintas razas origina cachorros que, una vez adultos, estarán en condiciones de reproducirse. Pero el apareamiento de dos especies distintas, incluso tratándose de especies tan próximas como el caballo y el asno, origina una descendencia estéril (en este caso, la mula). De aquí que asnos y caballos se clasifiquen como dos especies distintas. A veces se producen apareamientos, viables como tales pero infértiles, de especies más diferenciadas —leones y tigres, por ejemplo—, y aunque en rarísimas ocasiones la progenie tiene capacidad reproductiva, ello no indica sino que la definición de especie es un tanto confusa. Todos los hombres somos individuos de la especie *Homo sapiens*, optimista apelativo latino que significa «hombre sabio». Nuestros probables antecesores, el *Homo erectus* y el *Homo habilis* —a la sazón extintos—, se clasifican como pertenecientes al mismo género (*Homo*) pero a diferente especie, aunque nadie, por lo menos en fecha reciente, ha intentado investigar si el cruce de uno y otro con individuos de nuestra especie podría haber originado una progenie fértil.

En la antigüedad dominaba la idea de que se podía obtener descendencia a partir de cruces entre organismos de muy distinta

naturaleza. La mitología nos dice que el Minotauro muerto por Teseo era fruto de un toro y de una mujer, y el historiador romano Plinio manifiesta que el avestruz, recién descubierto por aquel entonces, era producto del cruce de una jirafa con un mosquito. (Debo suponer que lo sería del apareamiento de una jirafa hembra y un mosquito macho.) Es indudable que muchos apareamientos no deben haber sido intentados en la práctica por una comprensible falta de incentivos.

En el presente capítulo aludiremos repetidas veces al gráfico de la página 32. La curva de un trazo continuo muestra el momento en que aparecen por vez primera algunos importantes grupos taxonómicos. Ni que decir tiene que existen muchos más taxones que los representados por los escasos puntos que aparecen en la gráfica. Con todo, la curva ilustra de forma clara la gran cantidad de puntos que se necesitarían para representar en la figura las decenas de millones de taxones que han surgido desde que la vida hizo su aparición en el planeta. Los grupos taxonómicos más importantes, aquellos que han evolucionado más recientemente, son por regla general los más complejos.

El análisis del comportamiento de un organismo, esto es, el número de funciones que está llamado a ejecutar en el curso de la vida, permite hacerse una idea de su grado de complejidad. Con todo, este factor también puede determinarse atendiendo al mínimo caudal de información que contiene el material genético del organismo de que se trate. Un cromosoma humano, por ejemplo, contiene una larguísima molécula de ADN arrollada de forma helicoidal, con lo que ocupa un espacio mucho más reducido del que necesitaría en el caso de que se presentara completamente extendida. Dicha molécula de ADN está fragmentada en bloques o unidades autónomas unidos de forma similar a los peldaños de una escala de cuerda. Dichas unidades reciben el nombre de nucleótidos, de los que existen cuatro variedades. El lenguaje de la vida, el caudal de información hereditario, viene determinado por las diferentes disposiciones de los cuatro tipos de nucleótidos distintos. Así pues, podemos decir que el lenguaje de la herencia está escrito en un alfabeto de sólo cuatro letras.

Pero el libro de la vida es muy pródigo y, así, una molécula de ADN cromosómico del hombre está integrada por unos cinco

mil millones de pares de nucleótidos. Las instrucciones genéticas de los restantes taxones terrestres están escritas en el mismo lenguaje y con el mismo código. Es evidente, pues, que este lenguaje genético común constituye un indicio de que todos los organismos de la Tierra tienen un solo antecesor, de que en el planeta se produjo una única manifestación de vida hace aproximadamente cuatro mil millones de años.

Por regla general, el volumen informativo de cada mensaje viene representado en unidades llamadas bits, contracción del término inglés *binary digits* (dígitos binarios). El sistema aritmético más sencillo que existe no utiliza diez dígitos (como hacemos nosotros en virtud del accidente evolutivo que nos otorgó diez dedos), sino tan sólo dos, el 0 y el 1. Toda pregunta definida de manera suficiente es susceptible de ser respondida con un solo dígito binario, sea el 0 o el 1, es decir con un «sí» o un «no». En el supuesto de que el código genético estuviera escrito en un alfabeto con dos letras, en vez de en otro con cuatro, el número de bits contenido en una molécula de ADN equivaldría al doble de pares de nucleótidos. Pero dado que existen cuatro clases distintas de nucleótidos, el número de bits de información contenidos en la citada molécula de ADN es el cuádruple del número de pares de nucleótidos. Por lo tanto, si un solo cromosoma tiene cinco mil millones (5×10^9) de nucleótidos, contendrá veinte mil millones (2×10^{10}) de bits de información. (El símbolo 10^9 nos indica simplemente la unidad seguida de un determinado número de ceros; en el caso que nos ocupa, nueve.)

¿Qué cantidad de información suponen veinte mil millones de bits? ¿Cuál sería su equivalente si esta cifra se plasmara en un libro corriente escrito en un idioma moderno? Por regla general, los alfabetos de las distintas lenguas poseen de veinte a cuarenta letras, a los que debe añadirse de doce a veinticinco numerales y signos de puntuación. Por lo tanto, la mayoría de idiomas no requerirían más de sesenta y cuatro caracteres. Puesto que 2^6 es igual a 64 ($2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$), bastarían seis bits para configurar una letra o signo. Imaginemos que llegamos a esta determinación mediante una especie de juego de las «Veinte preguntas», en el que cada respuesta equivale al empleo de un solo bit para una pregunta a la que se contesta escuetamente con un «sí» o con un

«no». Supongamos que el carácter que deseamos especificar es la letra J. Para ello, procederíamos del siguiente modo:

PRIMERA PREGUNTA: ¿Se trata de una letra (0) o de otro signo (1)?

RESPUESTA: De una letra (0).

SEGUNDA PREGUNTA: ¿Forma parte de la primera mitad (0) o de la segunda mitad (1) del alfabeto?

RESPUESTA: De la primera mitad (0).

TERCERA PREGUNTA: ¿Se encuentra entre las siete primeras letras (0) de las trece que forman la primera mitad del alfabeto, o entre las seis restantes (1)?

RESPUESTA: Entre las seis últimas (1).

CUARTA PREGUNTA: Tomando las seis últimas letras (H, I, J, K, L, M), ¿forma parte de la primera mitad (0) o de la segunda mitad (1)?

RESPUESTA: De la primera mitad (0).

QUINTA PREGUNTA: Tomando dichas letras (H, I, J), ¿es la H (0) o bien la I o la J (1)?

RESPUESTA: La I o la J (1).

SEXTA PREGUNTA: ¿Se trata de la I (0) o de la J (1)?

RESPUESTA: De la J (1).

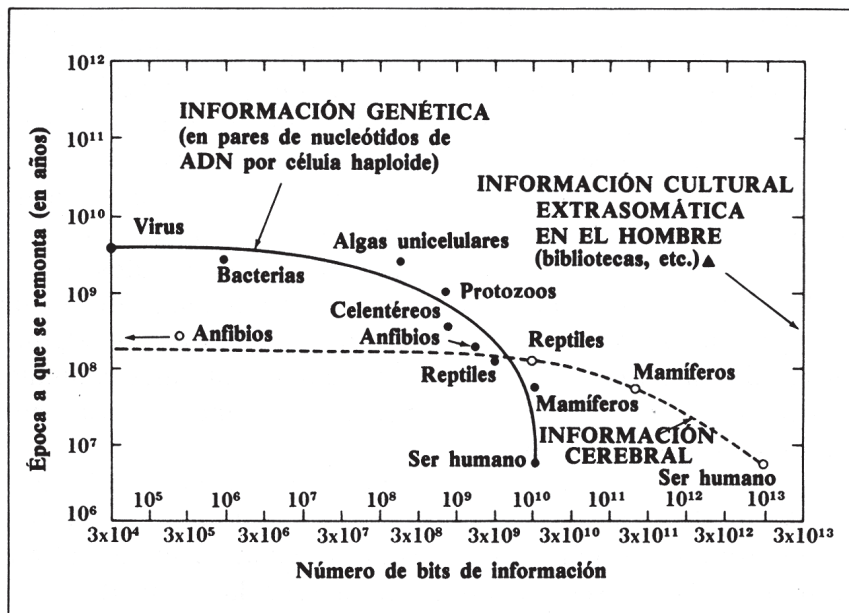
En consecuencia, especificar la letra J equivale al código binario 001011, con la salvedad de que no ha sido necesario formular veinte preguntas, sino seis, y es este detalle el que nos permite afirmar que para determinar una letra dada bastan solamente seis bits. Por tanto, veinte mil millones de bits corresponden poco más o menos a tres mil millones de letras ($2 \times 10^{10}/6 \cong 3 \times 10^9$). Si una palabra consta por término medio de seis letras, el volumen de información que admite un cromosoma humano se eleva a unos quinientos millones de palabras ($3 \times 10^9/6 = 5 \times 10^8$). Si la página corriente de un libro contiene alrededor de trescientas palabras, la cantidad antedicha nos daría unos dos millones de páginas ($5 \times 10^8/3 \times 10^2 \cong 2 \times 10^6$). Teniendo en cuenta que, por término medio, un libro contiene quinientas páginas de esta índole, el caudal informativo de un solo cromosoma es el equivalente a unos cuatro mil volúmenes ($2 \times 10^6/5 \times 10^2 = 4 \times 10^3$). De lo dicho se

desprende claramente que la secuencia de segmentos de la cadena de ADN que antes mencionábamos supone un formidable acopio de datos. Por lo demás, es natural que para especificar un objeto de tan exquisita construcción y complejo funcionamiento como el ser humano se requiera un caudal informativo tan inmenso. Los organismos simples son menos complejos y tienen menos funciones que realizar, de ahí que necesiten un menor acopio de información genética. Los computadores de los módulos del *Viking* I y II que se posaron sobre Marte en 1976 habían sido previamente programados con un volumen de instrucciones de algunos millones de bits. Por tanto, ambos vehículos espaciales contenían un poco más de «información genética» que una bacteria, pero muchísima menos que un alga.

El gráfico de la página siguiente nos muestra también la cantidad mínima de información genética de las moléculas de ADN en diversos grupos taxonómicos. La suma asignada a los mamíferos es inferior a la del ser humano, por la sencilla razón de que la mayor parte de ellos poseen menos información genética que el hombre. En el seno de algunas categorías taxonómicas —caso, por ejemplo, de los anfibios— el volumen de información genética varía considerablemente de una especie a otra, y se sospecha que buena parte de su ADN es redundante o carece de función específica. Este es el motivo de que en la gráfica conste solamente la cantidad *mínima* de ADN que contiene un taxón determinado.

En la gráfica se observa que hace tres mil millones de años el acopio de información de los organismos terrestres experimentó un marcado incremento, y que a partir de entonces el volumen de información genética ha ido aumentando lentamente. También se aprecia que si para poder sobrevivir el hombre necesita bastante más de varias decenas de miles de millones (varias veces 10^{10}) de bits de información, los sistemas extragenéticos deberán ser los encargados de facilitarle la cantidad complementaria; la velocidad con que se desarrollan los sistemas genéticos es tan lenta que el ADN no puede suministrar este suplemento de información biológica.

El material básico de la evolución son las mutaciones, es decir, los cambios hereditarios producidos en las cadenas de nucleótidos que se encargan de elaborar las instrucciones hereditarias en la



El gráfico muestra la evolución del acopio de información contenida en los genes y en el cerebro durante la historia de la vida en la Tierra. La curva de trazo grueso, jalonada por puntitos negros, representa el número de bits de información contenido en los genes de diversos grupos taxonómicos, de los que se muestra, también, la época de su aparición en la crónica geológica del planeta. Debido a las variaciones en la cantidad de ADN de una célula para ciertos grupos taxonómicos, sólo reseñamos en el gráfico el contenido *mínimo* de información correspondiente a un taxón determinado. Los datos se han tomado de la obra de Britten y Davidson (1969). La curva de trazo discontinuo, flanqueada o cortada por puntos en blanco, constituye una estimación aproximada de la evolución de la cantidad de información contenida en el cerebro y el sistema nervioso de los organismos en cuestión. La información que almacena el cerebro de los anfibios y otros animales de orden inferior caería fuera del margen izquierdo de la figura. También se muestra el número de bits de información contenido en el material genético de los virus, a pesar de que no se ha demostrado fehacientemente que los virus se originaran hace varios miles de millones de años. Cabe en lo posible que los virus hayan evolucionado en una etapa más reciente, por pérdida de funciones, a partir de bacterias u otros organismos más complejos. En el supuesto de que deseáramos ubicar la información extrasomática que se procura el hombre (bibliotecas, etc.), el punto correspondiente caería mucho más allá de la parte inferior del margen derecho de la figura.

molécula de ADN. Causas de mutación son la radiactividad ambiental, los rayos cósmicos del espacio, y, a menudo, el azar, que altera espontáneamente la disposición de los nucleótidos en contra de las previsiones formuladas sobre una base estadística. Los enlaces químicos se rompen accidental y espontáneamente. Hasta cierto punto el propio organismo regula las mutaciones, ya que posee la facultad de reparar determinados daños estructurales causados a su contingente de ADN. Hay, por ejemplo, una serie de moléculas que supervisan el ADN para detectar una posible deterioración de las mismas. Cuando se descubre una alteración particularmente nociva, ésta queda bruscamente cortada por una especie de «tijeras» moleculares, lo que permite recomponer el ADN. Con todo, esta facultad regeneradora no es, no conviene que sea, perfecta, puesto que la evolución necesita de las mutaciones. La mutación sobrevenida en una molécula de ADN del cromosoma de una célula de la piel del dedo índice no tiene influjo en la herencia, ya que los dedos de la mano no intervienen, por lo menos de una manera directa, en la propagación de la especie. Lo que sí influye son las mutaciones en los gametos, los óvulos y las células germinales, que son los agentes de la reproducción sexual.

De manera fortuita, ciertas mutaciones beneficiosas suministran el material de base que impulsa la evolución biológica, como, por ejemplo, la mutación que aporta melanina a determinada especie de mariposas nocturnas, con el consiguiente cambio de coloración del blanco al negro. Por regla general, esta clase de mariposas nocturnas se posa en el tipo de abedul que se da en Inglaterra, donde la coloración blanca del insecto le procura un camuflaje protector. En este caso la mutación de la melanina no supone una ventaja, pues las mariposas con pigmentación negra destacan visiblemente y son engullidas por los pájaros. Se trata, pues, de una mutación perjudicial. Pero cuando a raíz de la revolución industrial la corteza del abedul empezó a cubrirse de hollín, la situación cambió radicalmente, y sólo las mariposas que habían experimentado la mutación antedicha sobrevivieron. En este caso nos hallamos ante una mutación beneficiosa y, andando el tiempo, la mayor parte de las mariposas nocturnas adquieren la pigmentación negra, rasgo hereditario que se transmite a las futuras generaciones. De vez en cuando también se producen «retromutaciones»

que destruyen la adaptación inducida por la melamina y que serían beneficiosas para el insecto si se pudiera poner término a la contaminación industrial que padece Gran Bretaña.

Obsérvese que en esta interacción entre mutación y selección natural, la mariposa nocturna no realiza un *esfuerzo* consciente para adaptarse a los cambios del medio físico. Se trata de un proceso fortuito, sólo verificado por apreciaciones estadísticas.

Los organismos de mayor tamaño, como el hombre, sufren por término medio una mutación por cada diez gametos, o sea, que existe un 10 por 100 de probabilidades de que una célula germinal o reproductora lleve registrado un cambio transmisible por herencia en las instrucciones genéticas que han de configurar la estructura de la siguiente generación. Son mutaciones acaecidas al azar y casi siempre nocivas, pues es raro que un mecanismo de precisión mejore como resultado de un cambio fortuito en las instrucciones para construirlo.

Por otra parte, muchas de las mutaciones aludidas tienen carácter recesivo, es decir, no se manifiestan de forma inmediata. Con todo, el índice de mutación es a la sazón tan elevado que, al decir de diversos biólogos, si aumentase la cantidad de ADN genético se producirían índices de mutación demasiado altos. Si aumentara nuestra dotación de genes, sobrevendrían numerosos desajustes con excesiva frecuencia.¹ Si ello es así, tiene que existir un «techo» en cuanto al volumen de información genética que puede tener cabida en el ADN de los organismos más complejos. Por el mero hecho de su existencia, dichos organismos deben poseer considerables recursos de información extragenética. En todos los animales superiores, a excepción del hombre, esta información se contiene casi exclusivamente en el cerebro.

¿Cómo se distribuye la información contenida en el cerebro?
Examinemos los dos puntos de vista más antagónicos acerca de la

1. Hasta cierto punto el ritmo de mutación viene a su vez regulado por la selección natural, como se desprende del ejemplo aducido sobre las «tijeras moleculares». Pero es muy probable que exista un índice de mutabilidad mínimo e irreductible. 1.º) para que tengan lugar suficientes experimentos genéticos y la selección natural entre en acción, y 2.º) como elemento equilibrador entre las mutaciones producidas, supongamos, por los rayos cósmicos y los más eficaces mecanismos «restauradores» de la célula.