

1

El pasado remoto

1.1. LA TIERRA NACIENTE

1.1.1. *El eón Hadeense*

Nuestro planeta nació hace unos 4.500 millones de años, poco después de aparecer el Sol, y seguramente como aglomeración de muy diversos residuos de materiales pesados y de gases, expulsados desde su zona exterior por el astro en su convulsa vida incipiente.

Los cuatro planetas más próximos al Sol, los planetas *telúricos*, tienen una composición parecida a la de la Tierra, con una densidad notable y un tamaño más bien reducido. En cambio, los cuatro planetas que están más allá son mucho mayores pero también más livianos; en su composición predominan elementos ligeros y prácticamente carecen de materiales pesados.

Queda Plutón, considerado como el noveno planeta, aunque ahora sepamos que probablemente tenga un origen distinto de los restantes ocho. Desde luego, es el que está más lejos del Sol, como los planetas gigantes gaseosos, pero, en cambio, es pequeño y denso como los planetas telúricos. Además, tiene un satélite, Caronte, casi tan grande como él —de hecho, el conjunto se parece más a un planeta doble—, y su órbita en torno al astro es mucho más elíptica que la del resto, y además bastante más inclinada respecto al plano de la Eclíptica, que es el plano en el que más o menos giran los demás planetas. Todo esto significa que Plutón podría muy bien haber sido capturado a posteriori por la gravitación del Sol, quizá a partir del llamado Cinturón de Kuiper, que es la zona más

EL CLIMA

externa del Sistema Solar en la que se forman, por ejemplo, los cometas.

En todo caso, la Tierra es el mayor de los cuatro planetas telúricos, y está a una distancia del Sol que no es ni muy grande ni muy pequeña... Es decir, esa distancia es lo bastante grande como para que no nos abrasemos, como les ocurre a Mercurio y Venus, y lo bastante pequeña como para que no nos congelemos, como ocurre en Marte y el resto de los planetas exteriores.

Los 4.500 millones de años de historia de nuestro planeta los agrupamos hoy en cuatro grandes bloques temporales llamados *eones*. El eón Hadeense es el primero y se caracteriza por la inexistencia de vida. Duró poco más de 600 millones de años. Viene luego el eón Arqueozoico, en el que aparecen ya las primeras formas de vida primitiva; duró en total casi 2.000 millones de años, y terminó hace 2.500 millones de años. Le sucede el eón Proterozoico, con formas de vida más complejas y un planeta ya bastante estabilizado; duró alrededor de otros 2.000 millones de años.

Y, finalmente, tenemos el eón Fanerozoico, en el que estamos desde hace poco más de 600 millones de años. Es el que mejor conocemos porque nos han quedado numerosos fósiles de todos los reinos de la Biosfera. El Fanerozoico se divide a su vez en eras, éstas en periodos, éstos en épocas y éstas en edades. Estos términos —los veremos en detalle en el cuadro adjunto— son los históricos, si bien tienen su correspondiente término geológico. Porque conocemos el pasado del planeta gracias a los geólogos, que descifran la información que proporcionan las capas del subsuelo: lo más nuevo está encima —los geólogos dicen «estrato superior» por «más reciente»—, y lo más antiguo es tanto más viejo cuanto más profundo; por eso los estratos «inferiores» de los geólogos son los más antiguos.

Sabemos clasificar con cierta aproximación el tiempo pasado gracias a los vestigios —fósiles y rocas— de aquellas épocas remotas que vamos encontrando en la actualidad. Esta escala de tiempos se viene estableciendo internacionalmente desde hace dos siglos, y en general los límites entre las unidades coinciden con algún acontecimiento decisivo en la historia de la vida.

EL PASADO REMOTO

Los nombres que se utilizan son, para los no expertos, bastante difíciles y, además, se refieren a sucesos de la historia del planeta que no salen habitualmente en los periódicos, ni siquiera en muchos libros de texto. Pero, curiosamente, estos conocimientos están en perpetua revisión, a la luz de los descubrimientos que llegan día a día.

Por ejemplo, fue en julio de 2004 —hace, pues, poco tiempo— cuando se publicó el trabajo que mejor resume lo que fue la Era Ediacareense. Un nombre que ya es oficial, puesto que fue reconocido así poco después por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas. La Era Ediacareense se inició hace unos 630 millones de años, y su final, hace 542 millones de años, señala el inicio de la Era Paleozoica, cuyo primer periodo, el Cámbrico, vio aparecer de forma casi explosiva una enorme diversidad de seres vivos. Un momento crucial para el planeta, y para los seres vivos.

En estos momentos, en verano de 2006, son muchos los científicos que consideran que dicha Era Ediacareense no es el final del eón Proterozoico, sino que, por las características de aquellos extraños seres vivos, debería ser incluida como la primera Era del más reciente eón, el Fanerozoico.

En el recuadro de la página siguiente vemos cuáles fueron los eones, eras, periodos y épocas de la historia de la Tierra. La unidad del tiempo es el millón de años.

En sus primeros millones de años de vida, al inicio del eón Hadeense, la Tierra recibió casi permanentemente el choque de toda clase de meteoros y cometas. Estos últimos, compuestos básicamente de hielo y polvo interplanetario —hoy los definimos humorísticamente como «bolas de nieve sucia»—, fueron los que aportaron la mayor parte del agua que hoy existe en el planeta.

Todo aquel bombardeo modeló a la Tierra incipiente, y es casi seguro que, muy al principio, pudo llegar a tener la fuerza suficiente como para, en uno de los choques más grandes, desgajar un buen trozo y convertirlo en satélite. La Luna había, pues, formado parte de la Tierra naciente, pero fue muy pronto arrancada de su seno a golpes.

Lo que sí parece claro es que, tras unos pocos millones de años de un planeta convulso y nada estable, enseguida hubo gases algo

EL CLIMA

EÓN HADEENSE: 4.500 a 3.850 millones de años
EÓN ARQUEOZOICO: 3.850 a 2.500
EÓN PROTEROZOICO: 2.500 a 630
EÓN FANEROZOICO: 630 a HOY

Era Ediacareense: 630 a 542

Era Paleozoica: 542 a 251

Periodo Cámbrico: 542 a 488

Periodo Ordovícico: 488 a 443

Periodo Silúrico: 443 a 416

Periodo Devónico: 416 a 359

Periodo Carbonífero: 359 a 290

Periodo Pérmico: 290 a 251

Era Mesozoica: 251 a 65

Periodo Triásico: 251 a 199

Periodo Jurásico: 199 a 145

Periodo Cretácico: 145 a 65

Era Cenozoica: 65 a HOY

Periodo Terciario: 65 a 1.800.000

Periodo Cuaternario: 1.800.000 a HOY

Época Pleistoceno: 1.800.000 a 10.000

Época Holoceno: 10.000 a HOY

más pesados retenidos por la gravedad terrestre, y entre ellos debió de abundar el agua en forma de gas —vapor de agua—, mientras otros más ligeros —esencialmente, el hidrógeno y el helio— iniciaron su huida hacia el Espacio. El agua líquida comenzaría a condensarse unos cuantos millones de años más tarde; es, por tanto, también bastante antigua. En cuanto al agua sólida, el hielo, aparecería mucho después, cuando el planeta se estabilizó geológicamente y baja-

EL PASADO REMOTO

ron las temperaturas en las zonas polares y en las más altas montañas por debajo de los cero grados.

Aquel planeta naciente era, sin duda, terriblemente caliente ¿De dónde procedía ese calor? Una buena parte, como es lógico, se debía a su propio origen: el Sol, al nacer, expulsó de su zona superficial los elementos más pesados, que quedaron dando vueltas como gigantes pavesas incandescentes —a miles de grados— alrededor de él. Es probable que luego fueran poco a poco concentrándose en forma de fragmentos cada vez mayores (lo que dio lugar a los planetas telúricos) en las zonas más próximas al astro. Más allá, se concentraron fragmentos mucho más numerosos y pequeños (el cinturón de asteroides, entre Marte y Júpiter), y aún más lejos se fueron formando grandes planetas gaseosos y ligeros, de Júpiter a Neptuno, obviamente cada vez más alejados del Sol.

Pero en la Tierra recién nacida de hace algo menos de 4.500 millones de años había otras fuentes de calor, como por ejemplo las reacciones nucleares que se producían entre las rocas calientes. Aún hoy, ésa es la principal fuente del calor magmático del interior del planeta. Y en aquella época remota, con mayor razón todavía, la radiactividad debió de desempeñar un papel esencial en las altísimas temperaturas del planeta.

No nos ha quedado ningún vestigio de todo aquello en forma de rocas fósiles, porque todo lo que se solidificaba momentáneamente era descompuesto, licuado por las altas temperaturas, y vuelto a recomponer más tarde. En realidad, lo mismo sigue ocurriendo en la actualidad, sólo que los procesos de hundimiento de una parte de la corteza terrestre, y de aparición de nueva corteza bajo los océanos o en los continentes, se producen muy lentamente, a lo largo de miles y miles de años, y sólo en las zonas de mayor inestabilidad geológica, allí donde hay frecuentes terremotos y abundancia de volcanes activos.

Parece, pues, que durante unos pocos de millones de años la superficie del planeta recién nacido fue pura energía geológica a miles de grados, con innumerables y extensísimas zonas volcánicas en perpetua erupción, y rocas semisólidas muy calientes que iban y venían hacia las profundidades del magma subterráneo. Con una elevada

EL CLIMA

radiactividad y recibiendo toda clase de radiaciones igualmente letales procedentes del Sol.

Ya hemos evocado antes el infierno. Y no es una comparación que se les haya escapado a los científicos. Precisamente por eso aquel periodo inicial de la historia de la Tierra es denominado Hadeense, en recuerdo de Hades, el dios griego de los infiernos y hermano de Zeus y Poseidón, hijos y herederos de Cronos. No deja de ser poético: el dios del tiempo, Cronos (Saturno para los romanos) engendra a los dioses del cielo (Zeus, o sea, Júpiter), del agua (Poseidón, o sea, Neptuno) y del infierno (Hades, o sea, Plutón).

Lo importante de aquella época es que, por la movilidad del estado semilíquido de los materiales ardientes que componían el planeta, los más densos se fueron yendo hacia el fondo y los menos densos quedaron en las capas más superficiales. Se piensa que así fue como la inmensa mayor parte del hierro que existe en la Tierra —algo más de un tercio de la masa de nuestro planeta es hierro— se fue hacia el interior. Esa concentración generó aún más calor, elevando la temperatura promedio de la Tierra recién nacida hasta casi 6.000 °C, que es más o menos la temperatura que existe actualmente en la superficie del Sol. Aquello ocurrió al final de los doscientos primeros millones de años.

Y así fue como el núcleo de nuestro planeta incluyó el material más denso, a base de algo de níquel y mucho hierro, ambos en estado sólido a pesar de la temperatura, debido a la enorme presión que allí deben soportar. Por encima de este núcleo interno sólido, se iba formando un núcleo externo a base de hierro líquido viscoso, y por encima se formó el manto o astenosfera, a base de rocas fundidas de silicio con magnesio y aluminio. Así, la materia del subsuelo terrestre se fraccionó por orden de densidades, y el interior del planeta adoptó una estructura en capas concéntricas.

Por cierto, el hundimiento del hierro generó, además de calor, un aumento en la velocidad de rotación de la Tierra, que era en sus inicios bastante mayor que la actual. La concentración de masas en el centro de un planeta giratorio lo acelera obedeciendo la misma ley física que hace que una bailarina sobre hielo girando sobre sí misma aumente su velocidad de giro al replugar sus brazos hacia su

EL PASADO REMOTO

cuerpo (masas concentradas cerca del centro) y lo disminuía al abrir los brazos (masas alejadas del centro de giro).

Hoy creemos que el día y la noche juntos duraban muy poco hace algo más de 4.000 millones de años, quizá menos de diez horas en lugar de las veinticuatro actuales. Luego, la fricción del manto semilíquido, el choque del agua superficial de los océanos con las costas (por las olas y, sobre todo, las mareas) y otros efectos dinámicos de la Tierra en movimiento han ido poco a poco frenando el giro del planeta sobre sí mismo. Un proceso que prosigue inexorablemente: los días son cada vez más largos... No lo notamos, claro; el día se va alargando menos de un segundo por siglo.

También la Luna estaba al principio más cerca de la Tierra, de la que se va alejando desde entonces poco a poco. No sabemos calcular cómo estaba hace 4.000 millones de años, pero hace «sólo» 1.000 millones de años, el satélite estaba casi 40.000 kilómetros más cerca de la Tierra que hoy (más o menos un 10 por ciento más cerca); por aquel entonces, los días terrestres eran tan cortos que cabían 410 en un año en lugar de los 365 y pico actuales.

Pero volvamos al eón Hadeense y veamos cómo era —no lo sabemos con certeza, son sólo teorías relativamente consistentes aunque sin pruebas— el clima del joven planeta. Sin duda, debió de ser un clima inimaginablemente convulso. Desde luego, el planeta ya era de tamaño parecido al actual apenas diez millones de años después de haberse formado, pero ya hemos visto que giraba mucho más deprisa que ahora. Si hubiéramos estado allí, nos habría parecido que el cielo, visto desde el suelo, era negro en pleno día; lo mismo que les ocurrió a los astronautas que visitaron la Luna, porque allí no hay atmósfera —su tamaño es demasiado pequeño como para que la gravedad retenga gases de ningún tipo—. Pero es que en la Tierra, nada más nacer, tampoco había atmósfera, o al menos no era tan densa como la que luego se formaría. En el momento de su nacimiento, nuestro planeta alcanzó tales temperaturas (ya hemos visto que quizá hasta 6.000 °C) que despidió al Espacio exterior los gases que hubieran podido existir.

Lo interesante de aquellos momentos iniciales —los primeros cien o doscientos millones de años— no es, por tanto, la atmósfera,

EL CLIMA

que aún estaba por formarse, sino lo que ocurría en el interior del planeta. El núcleo de hierro sólido recubierto de hierro viscoso originó un intenso campo magnético a escala planetaria, como si fuera un enorme imán, la *magnetosfera*. Esta circunstancia natural resultaría providencial para la futura aparición de vida. Y es que todos los planetas del Sistema Solar están expuestos al *viento solar*, es decir, a un conjunto de radiaciones y partículas muy energéticas que barren, a partir del astro, todo el espacio circundante. Obviamente, con mayor intensidad cuanto más cerca está el planeta correspondiente. Si este viento solar choca con la atmósfera de un planeta como la Tierra, el efecto consiguiente sería barrer literalmente sus gases hacia el Espacio. Y sin atmósfera, no habría habido efecto invernadero, ni agua líquida, ni otras circunstancias necesarias para la posterior aparición de vida.

Pero la aparición de la magnetosfera acabó impidiendo ese barrido del viento solar, al canalizar las partículas cargadas y desviarlas de su trayectoria de colisión. Nuestro campo magnético es como una especie de invisible escudo protector que nos defiende del viento solar, desviándolo lejos de nosotros. Esto significa que, a partir de los doscientos millones de años de vida, la Tierra comenzó a acumular gases. Y el cielo dejó de ser negro para hacerse quizá en sus inicios de color rojizo y, mucho más tarde, cuando ya hubo mayoritariamente oxígeno y nitrógeno, de color azulado, como hoy.

De todos modos, la atmósfera de entonces no se parecía en nada a la de ahora. Estaba siempre cargada de electricidad, con tormentas continuas, una enorme humedad, un cielo siempre sucio con nubes de polvo y compuestos de azufre —por las incesantes erupciones volcánicas y por el frecuente choque de meteoritos—, y con temperaturas todavía altísimas por causa de un efecto invernadero disparatado, quizá parecido al que hoy observamos en Venus.

Aunque se iba enfriando, el suelo seguía estando muy caliente como consecuencia del propio origen del planeta —pavesas incandescentes escupidas por el Sol naciente—, pero también por los choques de meteoritos, por el magma cercano a la superficie o formando directamente lagos de lava; y también, y sobre todo, ya lo hemos dicho, por la desintegración nuclear de elementos químicos radiactivos

EL PASADO REMOTO

—potasio 40, yodo 129, torio 232, uranio 235...—, muy abundantes en ese magma. Aquella radiactividad desprendía un calor terrible.

Hoy todavía sigue estando muy caliente el interior de la Tierra, y en gran parte se debe a ese mismo factor radiactivo. Pero ya es mucho menor el flujo de calor que procede del interior y que nos llega a la superficie; de hecho, es muy pequeño comparado con el que procede del Sol: 0,06 vatios por metro cuadrado salen del subsuelo, frente a los 240 que nos llegan del astro rey.

También en el Hadeense calentaba el Sol a la Tierra, pero curiosamente bastante menos que ahora. Nuestro astro era también un recién nacido estelar, con poco helio comparado con el que hoy contiene. Nuestro Sol está hoy más o menos en la mitad de su vida, 5.000 millones de años después de su nacimiento. Pero en aquella época su luminosidad era casi un tercio menos que la actual, y el calor que nos proporcionaba era, obviamente, mucho menor.

El caso es que al comenzar a formarse la atmósfera, hace unos 4.300 millones de años, se fue poco a poco haciendo la calma en los climas, y las temperaturas fueron disminuyendo gradualmente. La radiactividad iba en descenso, quedándose confinada en las profundidades del planeta, al tiempo que se iban formando enormes placas sólidas flotantes, como un embrión de lo que luego sería la corteza terrestre, la *litosfera*. Los choques de meteoritos también fueron haciéndose menos frecuentes. Y con todo ese proceso de enfriamiento, parece lógico suponer que pudiera comenzar ya a existir agua líquida; hasta entonces sólo había existido vapor de agua en la atmósfera, porque la temperatura era muy superior a los cien grados. Primero se condensaría en los huecos más fríos, y luego, cada vez en mayor medida, en las zonas más bajas de la corteza, en forma de una especie de rocío a escala gigantesca, y también se condensó en el aire, en forma de nubes que aparecerían en las capas altas de la atmósfera. Si en aquellas nubes la condensación en sus zonas más altas y frías pudo propiciar la aparición de algún tipo de precipitación, al juntarse las gotitas en gotas más gruesas, es obvio que entonces pudo aparecer el fenómeno de la lluvia. Que luego esas gotas más grandes llegasen al suelo sin volverse a evaporar, sólo pudo depender de la temperatura del aire de las capas bajas.

EL CLIMA

Lo que sí parece obvio es que, debido a la temperatura muy alta de la atmósfera, las nubes debieron de alcanzar altitudes enormes; seguramente fueron gigantescas nubes de tormenta, que hoy llamamos cumulonimbos. Con frecuentes rayos y truenos, de intensidad hoy inimaginables y con precipitaciones cada vez más abundantes... y erosivas. El relieve terrestre ya no sólo obedecía a razones geológicas internas, sino que comenzó entonces a depender de los elementos atmosféricos.

El calor debía de ser terriblemente húmedo; hoy diríamos que agobiante, casi insoportable. Todavía, de vez en cuando, el calor de los impactos meteoríticos hacía hervir el mar aquí o allá. Eso sí, al disminuir en el aire el vapor de agua por condensarse cada vez en mayor proporción en agua líquida, y al disolverse en la lluvia y los mares incipientes buena parte del dióxido de carbono —los dos gases principales del efecto invernadero—, las temperaturas de la atmósfera debieron de bajar considerablemente. Así se inició el primer gran cambio climático, en forma de enfriamiento. El infierno Hadeense se iba haciendo cada vez menos inhóspito.

En aquellas masas líquidas cada vez más extensas y profundas, acumuladas en unas cuencas oceánicas que se iban estabilizando, el planeta se buscó una nueva «complicación»: la vida. De ello hace algo menos de 4.000 millones de años —existe cierto consenso en la cifra de 3.850 millones de años—, suceso lo bastante trascendente como para que hoy consideremos que merece la pena cambiar de eón.

El Hadeense da paso al Arqueozoico. El infierno da paso a la vida. Claro que no se trata de una vida como la que hoy conocemos, sino algo mucho más primitivo, en forma de células de tosca existencia capaces, eso sí, de nacer, crecer, reproducirse y morir. Que ésas son las funciones esenciales que compartimos, desde entonces, todos los seres vivos que han existido, existen y existirán en la Tierra. Aquellos primeros seres vivos microscópicos y primitivos no sólo han servido para que datemos la historia de la Tierra con un nuevo eón, sino que también dieron lugar al primero de los reinos de la vida, llamado reino de las móneras.

Y a todo esto, ¿cómo era el aire en ese momento, a finales del Hadeense?

EL PASADO REMOTO

El aire que hoy respiramos sabemos que contiene nitrógeno (más de las tres cuartas partes) y oxígeno (21 por ciento). El resto, apenas un 1 por ciento, lo conforman diversos gases, sobre todo el argón. Pero en aquellos tiempos, con la vida a punto de aparecer, no había oxígeno aunque sí muchísimo vapor de agua y dióxido de carbono, y bastante nitrógeno e hidrógeno. Y quizá también había, o se formaron pronto, otros gases a base de hidrógeno, carbono, nitrógeno y azufre: metano, amoníaco y gases sulfurosos, esencialmente.

Recientes estudios parecen apuntar a que la cantidad de hidrógeno pudo ser muy superior a lo que se pensaba debido a que su ritmo de escape hacia el Espacio —por ser el hidrógeno tan ligero que la gravedad terrestre no lo retiene— quizá fue más lento de lo que se pensaba. Al final del Hadeense todavía pudo haber, pues, hasta un 40 por ciento de hidrógeno en la atmósfera terrestre, lo que la haría, junto a la falta de oxígeno, fuertemente reductora —en química, lo contrario a oxidante— y, por tanto, más propicia para la formación de moléculas complejas por asociación de las más simples. Esas reacciones geoquímicas, favorecidas por la actividad tormentosa y la poderosa radiación solar, y gracias al poder disolvente del agua, originó sin duda toda una serie de productos que a su vez reaccionaban entre sí.

Aquellas moléculas cada vez más complejas siguieron reaccionando en el seno del agua y pudieron acabar por convertirse en los primeros ladrillos químicos de los futuros seres vivos. Por cierto, no deja de ser curioso que la vida precisara para su aparición de un planeta convulso, de clima extremado y condiciones geoquímicas no tan infernales como en sus inicios, pero casi. A lo mejor, la vida no es tan infrecuente en el Cosmos como muchos pensamos. Eso es lo que creía un científico tan escéptico y racional como Carl Sagan; y por esa razón puso en marcha el proyecto SETI para la búsqueda de inteligencia extraterrestre. Todavía sin éxito, aunque sólo hemos escudriñado una pequeñísima parte del Universo, la más próxima a nosotros. Quién sabe si con el tiempo y mucha paciencia... Por cierto, la película *Contact*, sacada de la novela homónima de Carl Sagan, es pura ciencia ficción. Sagan, como Asimov, era un gran científico, pero cuando escribía ciencia ficción... pues eso, era ciencia ficción.

EL CLIMA

Lo que parece bastante claro es que, desde aquellas remotas células del reino de las móneras, los seres vivos hemos estado poblando la Tierra de manera incesante y cada vez más invasiva. En realidad, lo que hemos poblado los seres vivos a lo largo de la historia del planeta es, más que la tierra, el agua; durante más del 80 por ciento del tiempo transcurrido, la vida fue exclusivamente submarina. Muchos nos preguntamos si no estará nuestro planeta mal bautizado. Somos más planeta Agua que planeta Tierra.

Si aquella atmósfera primitiva que circundaba los océanos y las tierras estériles y ardientes era tan diferente a la actual, no digamos el clima. Como el aire contenía aún mucho dióxido de carbono, mucho vapor de agua y bastante metano —los principales gases del efecto invernadero—, aquella atmósfera de final del Hadeense e inicio del Arqueozoico debió de ser, ya hemos visto, muy caliente y considerablemente húmeda, con tormentas espantosas y frecuentes, lluvias muy intensas y un cielo casi siempre cubierto de densas nubes de polvo y agua. Quizá por esa razón es comprensible que la incipiente vida microscópica sólo pudiera aparecer en el seno del agua marina, a resguardo de la agresividad de las radiaciones solares y los elementos atmosféricos convulsos.

Las primeras especies vivas, microscópicas bacterias monocelulares, sin membrana externa ni núcleo diferenciado en el que resguardar su material genético primitivo, jamás hubieran sobrevivido si se hubieran asomado al exterior de aquellos océanos calientes del planeta.

Pero lo que parece obvio, pues, es que el efecto invernadero es tan antiguo como el propio planeta Tierra. Lo único que ha variado a lo largo de los miles de millones de años transcurridos desde entonces, y eso es algo que probablemente también siga ocurriendo ahora, es la composición y la abundancia relativa de los gases que lo producen.

Antes de seguir adelante, quizá merezca la pena detenerse, aunque sea de pasada, en este efecto invernadero que parece consustancial al planeta mismo. Debió de desempeñar un papel esencial en los primeros tiempos del planeta, así como también ha seguido condicionando su historia hasta nuestros días, y sin duda lo seguirá ha-

EL PASADO REMOTO

ciendo en el futuro. De hecho, en cierto modo es el protagonista de este libro.

¿En qué consiste exactamente ese efecto invernadero? ¿Cómo es posible que el aire que rodea el planeta se comporte como una especie de envoltura protectora que mantiene al planeta caliente y a resguardo de la intemperie y el frío del exterior?

Algunos de los gases que existen en nuestra atmósfera tienen la capacidad de «almacenar» radiaciones de onda larga, o sea, calor. Y esto no sólo ocurre en la Tierra, sino en otras atmósferas planetarias; Venus, por ejemplo, nuestro planeta vecino y de tamaño sólo algo inferior al nuestro, posee una densísima atmósfera en la que predomina el dióxido de carbono. Y Marte, algo más pequeño y también bastante próximo a nosotros aunque ya bastante lejos del Sol, también tiene una tenue atmósfera, apenas la centésima parte de la de la Tierra; se supone que, en sus primeros millones de años de existencia, Marte pudo tener una atmósfera más densa, con efecto invernadero acusado y, por tanto, quizá con agua líquida en la superficie. ¿Pudo desarrollarse en su seno alguna bacteria similar a las que se desarrollaron en la Tierra al comienzo del Arqueozoico? Hay quienes creen que sí...

El caso de Venus es especialmente interesante, aunque la existencia de vida, antes y ahora, parece casi imposible. Por su proximidad al Sol y los gases de su atmósfera, Venus posee un efecto invernadero poderosísimo: la temperatura media en el suelo es del orden de 400 °C y la densidad de su atmósfera equivale a casi cien veces la nuestra. Además, su aire tiene gases corrosivos capaces de volatilizar en unas pocas horas cualquier ingenio espacial que aterrice en su superficie; esto no es un dato teórico, ya ha ocurrido en alguna ocasión... El bello planeta vecino, brillante lucero crepuscular que, por su belleza aparente, fue bautizado por los antiguos con el nombre de la diosa del amor, y al que los engañabobos de la astrología atribuyen un efecto benéfico, es en realidad el lugar más infernal que pueda imaginarse.

Por lo que respecta a la atmósfera de nuestro planeta, contiene dos grupos principales de gases invernadero, todos ellos en cantidades reducidísimas (su concentración no se mide en partes por cien

EL CLIMA

sino en partes por millón): los «antiguos», ligados a la propia existencia del planeta, y los «modernos», fabricados por la humanidad. Nos resistimos a aplicar la habitual terminología de «natural» y «artificial» porque lo que hace la mano del hombre no es menos «natural» que lo que hace un pájaro cuando fabrica un nido. Quizá si en lugar de artificial utilizáramos el adjetivo, más intelectual y riguroso, de «antropogénico», seríamos más precisos. Pero, claro, es más cómodo y sencillo utilizar el adjetivo artificial.

El grupo de los gases invernadero antiguos es el más influyente y está constituido, en orden de importancia como acumuladores de calor, por el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, los óxidos de nitrógeno y el ozono. En el segundo grupo, los gases recientes, están los de la famosa familia de los clorofluorocarbonados (CFC), moléculas que no existían antes de que las inventara el hombre.

Lo que está bien claro es que, gracias al efecto invernadero, la Tierra es un planeta habitable y bastante menos hostil para la vida de lo que sería sin esa especie de colchón térmico. Es más, si no hubieran existido en la atmósfera primitiva esos gases invernadero, es muy probable que nunca hubiera habido vida en nuestro planeta o, de haberla habido, nunca hubiera llegado a ofrecer la asombrosa diversidad que hoy conocemos. Y es que si en el aire de hoy no hubiera esos gases invernadero, la temperatura media del planeta Tierra sería de unos 18 grados bajo cero; con efecto invernadero esa temperatura media es de algo más de 15 grados sobre cero. El vapor de agua contribuye con algo más de 21 grados, el dióxido de carbono con 8, el óxido de nitrógeno y el ozono que se produce junto al suelo (nada que ver con el ozono estratosférico, el del famoso «agujero» de la Antártida) casi con 2 grados cada uno, el metano con algo más de un grado, y el resto, entre ellos los CFC, con algo menos de un grado.

Pero de todo esto hablaremos más adelante. Volvamos a nuestro planeta, a la remota época de hace aproximadamente unos 3.850 millones de años, cuando en el seno de sus océanos se da el insólito fenómeno que lo iba a alterar profunda y generalizadamente: la vida. ¿Cómo pudieron aparecer los seres vivos a partir de las moléculas inorgánicas existentes en un planeta recién formado, de clima infernal y condiciones geológicas de enorme inestabilidad?

EL PASADO REMOTO

No es fácil encontrar respuestas convincentes, aunque cada vez vamos entendiendo un poco mejor el proceso, a medida que los científicos aportan nuevos elementos de conocimiento y reflexión. Lo interesante es que aquellas reacciones químicas tan especiales requerían, necesariamente, que hubiera carbono en las sustancias reaccionantes. Y es que el átomo de carbono es bastante mágico: su estructura electrónica le permite combinarse de muchas maneras con átomos muy diferentes a él. Incluso le es fácil formar largas cadenas de moléculas en las que los eslabones son los átomos mismos de carbono.

En el eón Hadeense, las condiciones externas —calor, humedad, electricidad ambiente— facilitaron que los átomos de carbono se combinaran con hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre para generar una enorme variedad de sustancias. Estas sustancias que contienen carbono siguen existiendo hoy, y continúan interaccionando entre sí y evolucionando hacia otras más complejas. Y esos seis elementos básicos —carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre— son el denominador común de todas las formas de vida, y suponen más del 99 por ciento del peso de cualquier ser vivo.

Su combinación en la Tierra incipiente del Hadeense seguramente produjo toda clase de compuestos orgánicos —o sea, de compuestos de átomos de carbono— capaces en algún momento, con mucho tiempo por delante, de autorreplicarse.

1.1.2. *El eón Arqueozoico*

Tampoco tenemos demasiados datos de esta época tan remota de nuestro planeta, pero su nombre es revelador: procede del griego *archeos*, «viejo», y *zoos*, «vida»; la vida más antigua de la Tierra. Este eón comienza hace 3.850 millones de años y termina hace 2.500 millones de años.

Parece claro que ya existía un campo magnético, seguramente desde el final del Hadeense, que debía de ser más bien débil, bastante inferior al actual. Luego fue aumentando de intensidad a lo largo de todo el Arqueozoico hasta doblar con creces la intensidad actual,

EL CLIMA

precisamente en el momento en que se produce la transición del Arqueozoico al Proterozoico, hace unos 2.500 millones de años. No parece que este hecho tenga nada que ver con la evolución de las móneras hacia las protocistas, que es la efemérides que sirve de frontera entre esos dos eones; pero es difícil afirmarlo con rotundidad. En todo caso, el campo magnético terrestre volvió a disminuir a partir del Proterozoico hasta quedarse en los valores actuales. Por cierto, el valor actual de la magnetosfera lleva disminuyendo en los últimos 150 años (aproximadamente un 10 por ciento) y hay quien teme que llegue a desaparecer en unos pocos siglos más. Mala noticia, porque se debilita nuestro colchón magnético protector del viento solar.

Lo curioso es que el campo magnético no sólo ha venido variando en intensidad desde hace muchos millones de años, sino que también ha ido cambiando su posición. Es decir, el polo norte magnético no necesariamente ha coincidido siempre con el polo Norte geográfico; de hecho, más bien nunca. Por ejemplo, hace 3.500 millones de años el norte magnético estaba en el mismo centro... ¡de África! Y mucho más recientemente, hace menos de un millón de años, los polos magnéticos estaban invertidos respecto a los polos geográficos: el sur geográfico, en la Antártida actual, casi coincidía con el norte magnético.

En todo caso, lo que estas variaciones magnéticas significan es que, por una parte, el dipolo terrestre ha venido alejando de nosotros, desde el Arqueozoico, el letal viento solar, como ya hemos visto, y por otra, ponen de manifiesto que en el interior del planeta se había ido estabilizando la zonificación en forma de capas concéntricas, por encima de las cuales ya aparecían, en la superficie, las primeras placas continentales. De hecho, el 50 por ciento de la corteza continental existente hoy se formó en el eón Arqueozoico.

Esas placas continentales derivaban muy lentamente durante millones de años, chocando entre sí, y formando y deshaciendo continentes y océanos —como sigue ocurriendo hoy—, lo que dio lugar a los primeros procesos de erosión y sedimentación en las tierras emergidas: las tormentas, los vientos y la esorrentía habían iniciado ya su habitual proceso de desgaste, que tan bien conocemos hoy.

EL PASADO REMOTO

En cuanto al clima, no era demasiado grato: el aire contenía cada vez menos vapor de agua y dióxido de carbono, porque este, diluido en el agua líquida, precipitaba luego hacia el mar y allí se transformaba en carbonato. Pero aún quedaba bastante cantidad de los dos gases como para que el efecto invernadero fuese poderoso, sobre todo teniendo en cuenta que la proporción de metano, otro potente gas de efecto invernadero, había aumentado poco a poco, quizá por descomposición anaeróbica —a falta de oxígeno— de los residuos orgánicos de las mórneras, que comenzaban a ser relativamente importantes. Además, debía de haber cada vez más nitrógeno, mientras que el hidrógeno seguía disminuyendo hasta desaparecer del todo. Por supuesto, el oxígeno brillaba por su ausencia.

La intensidad del Sol era todavía menor que en la actualidad, pero a lo largo del eón Arqueozoico fue en aumento. Y, además, nuestro planeta, con pocos continentes y nada de hielo, tenía un albedo pequeño; el albedo es la proporción de energía que entra respecto a la que sale. Vista desde fuera, una Tierra con albedo grande brilla mucho: la mayor parte de la energía entrante se refleja al exterior (de hecho, un espejo tiene un albedo altísimo, próximo al cien por cien). En cambio, una Tierra más bien opaca tiene un albedo pequeño, lo que significa que remite poca energía solar de la que recibe, es decir, absorbe mucha de esa energía.

En resumen, con un Sol cada vez más activo, un efecto invernadero aún poderoso y un albedo más bien pequeño, lo que tenemos como resultado es un clima muy cálido, quizá bastante más que el actual. En los inicios del Proterozoico, el clima era muy cálido y la Tierra estaba no sólo desprovista de oxígeno sino también de hielos.

Los científicos piensan, no sin cierta sorpresa, que los climas terrestres no han variado demasiado, si se consideran globalmente. Al menos si comparamos esas variaciones con los brutales cambios que se han producido en otros planetas próximos, como, por ejemplo, Venus y Marte. Si el efecto invernadero actual hace que la temperatura media (que hoy es de más de 15 grados, como promedio anual para todo el planeta) esté unos 33 grados por encima de la que habría sin gases de efecto invernadero (en teoría, esa temperatura sería

EL CLIMA

glacial, 18 grados bajo cero), a lo largo de los casi 4.000 millones de años que han transcurrido desde el Arqueozoico (del Hadeense no tenemos ni idea, pero no constituía propiamente el planeta que luego iba a ser...), no parece que esa diferencia haya llegado nunca siquiera a los 50 grados; es decir, a lo largo de unos 4.000 millones de años la Tierra apenas ha superado alguna vez los 30 grados en promedio. No hay que engañarse: cuando tuvimos esa temperatura (quizá en el Carbonífero, hace más de 300 millones de años, quizá en el Arqueozoico, hace más de 2.000 millones de años, no lo sabemos muy bien) hacía un calor espantoso en el planeta, y no había zonas polares heladas.

En cuanto a las glaciaciones más gélidas, como enseguida veremos, en algún momento llegó a congelarse la Tierra casi entera, con una temperatura media anual para todo el planeta algo inferior a los cero grados, que es muchísimo frío. Piénsese que ahora tenemos un poco más de 15 grados de media.

En todo caso, en 4.000 millones de años nuestro planeta ha oscilado entre dos extremos no excesivamente dispares: un máximo de 30 grados y un mínimo de unos pocos grados bajo cero. En cambio, en Marte esas oscilaciones fueron mayores, quizá cien veces más.

Estas reflexiones, ante la perspectiva actual del calentamiento global, ¿resultan tranquilizadoras... o todo lo contrario?

El caso es que hace unos 3.850 millones de años, cuando aparecen las primeras células que ahora clasificamos en el reino de las móneras, el agua del mar estaba muy caliente en la superficie. Se ha llegado a decir que estaba a 80 grados, pero estudios recientes han rebajado bastante esa cifra. Lo más probable es que los mares estuvieran a una temperatura en torno a los 30-50 grados. Es mucho margen, sí, pero la Tierra no tenía una temperatura uniforme —como tampoco la tiene hoy— y, además, no somos capaces de precisar mucho más. Ya parece bastante milagroso que los geólogos hayan deducido estos datos a partir del análisis de minerales presentes en las evaporitas de entonces, como el yeso, por ejemplo.

Y a todo esto, ¿cómo aparecieron los primeros seres vivos en aquel lugar tan inimaginablemente distinto a todo lo que conocemos?

EL PASADO REMOTO

La verdad es que, como hemos visto al final del apartado anterior, no tenemos mucha idea del proceso. Eso sí, hubo dos premisas indispensables para que el azar funcionase: posibilidades, aunque fueran mínimas, y mucho tiempo por delante.

Para que apareciesen organismos vivos, tuvieron que darse como mínimo las condiciones siguientes:

- ausencia de oxígeno libre (de haberlo habido, hubiera oxidado las primeras moléculas orgánicas prebióticas, y éstas nunca hubieran alcanzado la complejidad química propia de los seres vivos);
- una fuente de energía poderosa (el volcanismo casi generalizado, el Sol muy activo, las tormentas eléctricas muy frecuentes e intensas, incluso la todavía potente radiactividad del subsuelo);
- la posibilidad de que hubiera sustancias químicas capaces de disolverse o agruparse en forma de bloques, gracias a la existencia del agua líquida (minerales inorgánicos, gases disueltos, dióxido de carbono, por ser el carbono un átomo capaz de aglutinar a muchos otros átomos),
- y, como ya hemos dicho, mucho tiempo por delante (si algo ocurre al azar, éste no tiene mejor aliado que el tiempo).

Todas esas condiciones se dieron al comienzo del eón Arqueozoico, pero la pregunta ¿cómo se originó la vida? sigue siendo una de las lagunas más interesantes de nuestro conocimiento. Hay que aclarar que decimos interesante porque, al menos, sabemos más o menos cuándo sucedió y podemos conjeturar cómo ocurrió.

Los fósiles más antiguos que conocemos, encontrados en la parte occidental de Australia, son los *estromatolitos*, residuos de enormes aglomerados de cianobacterias —bacterias verdeazuladas capaces de realizar la fotosíntesis—. Hoy todavía sobreviven, pero ya vivían hace 3.500 millones de años. Es seguro que esas bacterias, que eran ya bastante sofisticadas (tenían y tienen un atisbo de membrana celular, poseían genes de ADN y presentaban un metabolismo bastante complejo, si bien eran móneras procariotas, o sea, células sin nú-

EL CLIMA

cleo), debieron de evolucionar a partir de formas de vida más sencillas. Los científicos piensan que las primeras células vivas debieron de ser unas bacterias elementales con ARN como material genético. El ARN hacía, de manera muy básica, las mismas funciones que hoy realiza el ADN en las células complejas.

La pregunta, ahora, es ¿de dónde surgió ese ARN? Como no hay forma de saberlo, hay que cambiar la pregunta y plantearse una nueva: ¿en qué condiciones externas pudo ocurrir eso?

Una buena idea sería realizar experimentos simulando cómo era la Tierra hace 4.000 millones de años, y ver qué pasa. La primera hipótesis sólida la había formulado el ruso Oparin en 1922: la vida podía haber surgido en su forma más primitiva a partir de los minerales, los metales y los elementos simples carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. La energía de los rayos de tormenta, de la radiación ultravioleta solar, de los impactos cometarios y de las frecuentes erupciones volcánicas permitió que todos esos productos, dentro del agua y formando una especie de «sopa primordial», se combinaran hasta formar aminoácidos y nucleótidos. Luego, éstos se agruparían para formar proteínas y ácidos nucleicos.

En 1953, los estadounidenses Miller y Urey demostraron que en las condiciones descritas por Oparin, reproducidas en un laboratorio, se obtenían productos orgánicos complejos, aunque desde luego no células vivas. Más adelante, otros científicos han reproducido y mejorado el experimento, y han producido aminoácidos, azúcares y nucleótidos. Pero nadie sabe aún cómo se unían entre sí los aminoácidos para formar proteínas, cómo los nucleótidos se unen para formar ARN y ADN, y, en suma, cómo el conjunto se convierte en una célula autónoma capaz de reproducirse.

Recientemente, en octubre de 2004, el estadounidense Leslie Orgel, junto con dos colegas del Instituto Salk, han mostrado el importante papel de una sencilla molécula presente en los gases de origen volcánico, el sulfuro de carbonilo, un excelente catalizador para unir aminoácidos y formar, por tanto, proteínas tan complejas como se quiera (las proteínas son como casas construidas con muchos ladrillos, los aminoácidos). Orgel ha descubierto una molécula semejante al ADN con cincuenta nucleótidos —los nucleótidos son los

EL PASADO REMOTO

«escalones» de la escalera en doble hélice que forma la molécula de ADN—, que se formó espontáneamente a partir de compuestos de carbono sencillos y produjo sales en ausencia total de células vivas o de compuestos complejos.

También en los últimos años ha habido científicos, como Manfred Eigen y sus colegas del Instituto Max Planck de Gotinga, que han obtenido moléculas de ARN que se han autorreplicado en ausencia total de células vivas. Y Sol Spiegelman —ya fallecido— y Donald Mills, de la Universidad de Columbia, sintetizaron en un tubo de ensayo virus de ARN infecciosos capaces de reproducirse continuamente en el interior de las células que habían infectado.

De ahí la idea, bastante popular, de que con un poco de electricidad y una buena «sopa» de sustancias químicas en los mares de finales del Hadeense se pudieron formar cadenas de carbono con hidrógeno y otros elementos capaces de producir vida. Como si la vida hubiera podido aparecer súbitamente, casi de golpe, a partir de ese caldo primigenio. Pero hay científicos que piensan que la probabilidad de que eso ocurriera es minúscula, aun dándole al factor azar la ventaja de contar con millones de años; muchos de estos científicos piensan que las primeras moléculas precursoras de la vida pudieron venir a lomos de meteoros o cometas, como una siembra cósmica de la vida elemental. Porque es cierto que se han hallado al menos cinco distintos tipos de nucleótidos (componentes del ADN y el ARN) y varios aminoácidos (componentes de las proteínas) en meteoritos y en el Espacio exterior.

Pero subsiste un escalón que aún no se ha podido traspasar: entre las moléculas químicas más complejas y la más sencilla de las células, hay una enorme distancia. Entre los aminoácidos y los nucleótidos, por una parte, y las proteínas y el ADN, por otra, hay una enorme diferencia de tamaño y complejidad. ¿Pueden unos cuantos millones de años, o centenares de millones de años, permitir el salto de lo simple a lo complejo?

Por ahora, sólo llevamos investigando estos temas unos cuantos decenios, y hemos llegado bastante lejos. ¿Resulta impensable que en otros pocos decenios podamos conseguir que se genere espontáneamente una célula viva en un tubo de ensayo? Parece bastante

EL CLIMA

probable que ya no en una sola ocasión, sino incluso en muchas, los aminoácidos, los nucleótidos, los azúcares y los fosfatos —componentes esenciales de las proteínas y del ADN— se hayan podido formar y hayan conseguido hacerse más y más complejos. Quizá gracias a la protección que pudiera haberles brindado una especie de burbuja de moléculas grasas, o de estructuras parecidas a la cerámica.

¿Y ya está?

Pues no; aún no sabemos si es eso lo que pasó. De todos modos, parece excitante que las primeras células, que hemos denominado *arqueobacterias* —literalmente, bacterias muy antiguas—, puedan vivir incluso hoy en condiciones muy extremas; por ejemplo, en las fosas marinas muy profundas donde hay escapes volcánicos. Esas zonas de mar abisal, sin oxígeno y apenas luz, ofrecen, en cambio, condiciones parecidas a las de la sopa primordial que describía Oparin. Eso sí, es seguro, y ahora sabemos que es importante, que existe sulfuro de carbono.

Antes de terminar este repaso somero al eón Arqueozoico, quizá merezca la pena resumir lo que creemos saber acerca de la aparición de la vida en los mares terrestres.

Parece claro que los compuestos orgánicos simples pudieron formarse —en remotas galaxias y transportados luego a lomos de cometas, o en la misma Tierra— a partir de las condiciones ambientales físico-químicas existentes hace unos 4.000 millones de años. Lo que ya no está tan claro es de qué forma eso dio lugar a las proteínas y los ácidos nucleicos. Coexisten dos teorías, una «clásica» y otra más moderna llamada «mundo ARN». La clásica, que hoy día vuelve a tener muchos adeptos, apela esencialmente a la agrupación al azar —hubo muchos millones de años de condiciones óptimas, incluso más de un centenar de millones de años, y eso es mucho tiempo— de aminoácidos, fosfatos y proteínas, actuando la arcilla como catalizador de las reacciones y, como ahora sabemos, con intervención directa del sulfuro de carboxilo.

La del mundo ARN es una teoría más compleja y más difícil de entender, y se sale de los límites de este libro. Pero parecía haberlo solucionado todo en la década de 1980. Sin embargo, ahora se le han

EL PASADO REMOTO

encontrado algunas objeciones nada desdeñables y está un poco a la baja...

En todo caso, lo esencial para el propósito de este libro es la influencia de aquellas primeras formas de vida en los posteriores cambios climáticos del planeta. Influencia que resultó esencial, como más adelante veremos. Los seres vivos no sólo podemos alterar ahora los climas con las emisiones industriales; eso es algo que venimos haciendo desde hace unos 3.000 millones de años, cuando sólo éramos bacterias primitivas.

Las cianobacterias, que pertenecían como las arqueobacterias al único reino biológico existente, el de las móneras, aparecieron hace unos 3.500-3.800 millones de años. O sea, que la fotosíntesis se inicia en esa época, aunque de manera muy lenta. En resumen, el proceso fotosintético es tal que las células vivas captan el dióxido de carbono del aire —gracias a la clorofila y con ayuda de la energía solar—, acumulan el carbono en sus moléculas orgánicas y rechazan el oxígeno, que se disuelve en el agua o se va al aire. Ese oxígeno es captado por otros átomos de carbono e hidrógeno para formar de nuevo agua y dióxido de carbono, y vuelta a empezar. Pero este proceso de nueva oxidación acabó siendo un poco más lento que la fotosíntesis de las cianobacterias cada vez más numerosas, y así es como empezó a sobrar algo de oxígeno libre que finalmente acabaría por ir acumulándose en la atmósfera. Pero eso no ocurrió hasta el final del Arqueozoico, porque en esos tiempos las cianobacterias eran muy minoritarias frente a otros microorganismos que utilizaban reacciones bioquímicas diferentes para obtener su energía vital. Es probable que casi todo el carbono orgánico creado en la fotosíntesis por las todavía escasas cianobacterias se volviera a oxidar en su propio metabolismo, y también en su descomposición al morir. O sea, que el carbono volvía a convertirse en dióxido de carbono, y el oxígeno se consumía en el proceso opuesto al de la fotosíntesis.

En el Arqueozoico, la mayor parte del oxígeno producido por la fotosíntesis desaparecía sin quedarse en el aire. Pero, tal y como ha ocurrido siempre y sigue ocurriendo hoy, una pequeña parte de la materia orgánica marina se depositaba al morir, para quedar luego

EL CLIMA

enterrada en los sedimentos de los fondos marinos. No tenía, pues, posibilidad de oxidarse, y eso hacía que «sobrase» algo de oxígeno que esta vez sí acababa por salir al aire libre. Por esa razón, al final del eón Arqueozoico la atmósfera comenzó por fin a tener oxígeno. Habían tenido que transcurrir casi 2.000 millones de años para que hubiera en el aire terrestre casi tanto oxígeno como hay ahora, y para que se formase en la alta atmósfera una delgada concentración de un raro tipo de oxígeno con tres átomos en lugar de dos, que hoy llamamos ozono. La atmósfera de la Tierra había carecido de oxígeno durante la primera mitad de su vida, pero ya nunca volvería a carecer de él. De eso se iban a ocupar todos los organismos verdes con clorofila...

Todo este proceso es, como puede verse, muy singular. Y, claro, alteró de forma notable la composición de la atmósfera. No sólo por la aparición del oxígeno, sino, sobre todo, porque también iban disminuyendo poco a poco el metano y el dióxido de carbono, este último captado de forma creciente por los organismos monocelulares con clorofila. ¿Consecuencia? Disminución del efecto invernadero y descenso de las temperaturas a lo largo del eón que estamos considerando. El clima, al final del Arqueozoico, hace 2.500 millones de años, no debía de ser muy diferente al actual, a grandes rasgos; en todo caso, mucho menos cálidos que al inicio. Los grandes calores casi permanentes se habían terminado. El siguiente eón, el Proterozoico, se caracterizará ya por los grandes cambios climáticos, incluidas las espectaculares glaciaciones.

Además de este aspecto climático —como casi siempre, directamente relacionado con la vida y con la geología—, al final del eón Arqueozoico se produce un hecho aún más singular si cabe: la aparición de unas células mucho más complejas y especializadas, las células eucariotas que hoy agrupamos en el reino de la protistas (o protoctistas).

Todo ello nos lleva a un nuevo eón, el Proterozoico, que nos remonta a 2.500 millones de años.

EL PASADO REMOTO

1.2. LA TIERRA ESTABLE

1.2.1. *El eón Proterozoico*

El Proterozoico —en griego, casa de la primera vida, quizá porque se supone que la vida arcaica del reino de las móneras era sólo eso, arcaica...— comenzó hace 2.500 millones de años y hasta hace poco se consideró que terminaba hace 570 millones de años, cuando apareció la fauna con partes duras —conchas, esqueleto, cubiertas de colágeno, etcétera—. Hoy se discute si el periodo Ediacareense, más antiguo pero relativamente fugaz (hace 630 millones de años) vio nacer una fauna de ese tipo, por lo que quizá ahí debiera ponerse el límite. De hecho, es lo que hemos aceptado en este libro.

Durante este eón se produjo la primera crisis ambiental, tal y como hoy llamamos a los problemas relacionados con la contaminación. Una contaminación que, obviamente, nada tiene que ver con la mano del hombre, porque nosotros estamos en el planeta, como mucho, desde hace dos o tres millones de años, no cientos ni miles de millones.

Todo lo que había ido ocurriendo en los tiempos de la Tierra recién nacida —eón Hadeense—, y lo que luego apareció en el seno de los mares como vida primitiva de las móneras —eón Arqueozoico—, estaba directamente relacionado con algo que podríamos llamar *geovida*. Es decir, algo así como la *vida geológica* que observamos en todo el Universo; las estrellas nacen, se multiplican y mueren, los distintos elementos químicos se forman en esas estrellas y luego cobran nueva vida geológica en otros lugares, y así sucesivamente.

En el Arqueozoico se inicia otro tipo de vida, que podríamos llamar *biovida*, y que se basa en los mismos componentes esenciales que la *geovida* —partículas elementales, átomos, moléculas—, pero con un mayor nivel de complejidad y la posibilidad de autorreplificarse cíclicamente; a esto último lo llamamos reproducción.

Las moléculas esenciales de la *biovida* son muy grandes en tamaño y estructura, aunque están compuestas de unos pocos átomos bastante sencillos: carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, etcétera. Estas macromoléculas esenciales de la *biovida* son las proteínas y los

EL CLIMA

ácidos nucleicos. Y buena parte de aquella vida incipiente, plasmada en seres microscópicos, monocelulares y muy elementales —comparados con los seres vivos actuales—, comenzó a provocar, bastante después de su aparición, ya en los inicios del nuevo eón que estamos considerando —el eón Proterozoico—, la primera *contaminación*, originada por un gas corrosivo, que en estado libre era enemigo de la vida incipiente: el oxígeno. Podemos decir que casi desde sus inicios, la biovida inventó la contaminación.

Hasta entonces —es decir, más o menos la mitad del tiempo que lleva existiendo la Tierra—, el poco oxígeno que aparecía en diversas reacciones geológicas e incluso biológicas —estas últimas por fotosíntesis de las primeras y más antiguas cianobacterias— era inmediatamente capturado por otros elementos, por lo que nunca llegaba a existir en estado libre; al menos, no en cantidades significativas. Pero en los primeros tiempos del Proterozoico es cuando comienza a aumentar muy deprisa el oxígeno libre en la atmósfera terrestre. A lo mejor hay quien piense que es un poco fuerte decir que el oxígeno, un gas que solemos considerar hoy, con razón, absolutamente vital, es un contaminante, pero...

El oxígeno, dicen los químicos, es un gas fuertemente reactivo. Es decir, reacciona con los demás cuerpos muy fácilmente. Los oxida, nunca mejor dicho; es decir, los corroe, los distorsiona, los vulnera, los cambia. Sencillamente, se une a los demás elementos. ¿Para bien? Pues depende de lo que consideremos bueno o malo. En el caso de las incipientes estructuras vivientes —las distintas especies de móneras—, es obvio que el oxígeno hubiera oxidado sus estructuras químicas e impedido así que proliferara la vida. Por fortuna, no había oxígeno libre, o muy poco, en el aire y en el agua. Pero es que, además, el oxígeno es parte inseparable del agua y del dióxido de carbono, pero siempre combinado al hidrógeno y al carbono. O sea, que, formando parte de las moléculas más «vitales», el oxígeno es positivo para la vida; pero si está en estado libre, es negativo.

La acción fotosintética de las cianobacterias comenzó a incrementar a finales del Arqueozoico la cantidad de oxígeno libre en el aire. Y en los primeros millones de años del Proterozoico, su concentración en la atmósfera aumentó aún más deprisa, debido a la

EL PASADO REMOTO

mayor efectividad fotosintética de otros seres vivos, complementarios de las mórneras, pero mucho más eficaces en sus metabolismos. Estos nuevos seres vivos, igualmente monocelulares y microscópicos en sus inicios, pertenecen a lo que hoy llamamos reino de las protoctistas (o protistas; los científicos no parecen haberse puesto aún de acuerdo al respecto). Un salto cualitativo, y poco después también cuantitativo, que resultaría esencial para la evolución biológica.

Lo esencial es que sabemos todo esto porque aparecen en los suelos que hoy identificamos como pertenecientes a aquella época inicial del Proterozoico unos minerales de color rojizo —las *capas rojas*— que demuestran sin duda que el hierro y otros metales de la superficie comenzaron a oxidarse hace unos 2.000 millones de años. Lo que quiere decir que había ya bastante oxígeno en el aire como para oxidar rocas. Si al final del Arqueozoico el aire apenas tenía un 1 por ciento de oxígeno, hacia la mitad del Proterozoico, hace unos 1.600 millones de años, ya era del 18 por ciento (hoy tenemos un 21 por ciento).

El oxígeno corrosivo en el aire iba a impedir que las nuevas formas de vida, más versátiles y con capacidad de adaptación, salieran del agua. La atmósfera terrestre había sido «contaminada» por la propia vida que podría sufrir los efectos de dicha contaminación. Mu- chísimo más tarde, la vida —no la vida microscópica, sino la autointitulada inteligente— inventaría bastantes más contaminantes, como bien sabemos. Es como si el sino de la biovida fuera *corromper*, en cierto modo, la geovida.

En esos tiempos —recordemos que el Proterozoico se inició hace 2.500 millones de años—, los continentes se deformaban o desplazaban mucho más lentamente que en épocas anteriores, y también eran modificados por la erosión del viento, el mar y las precipitaciones; más o menos como ahora. Por eso, a todo el periodo que viene a partir de ahora los expertos lo suelen denominar «la Tierra estable», por contraste con la Tierra anterior, altamente inestable desde el punto de vista geológico y químico.

En todo caso, parece indiscutible que las dos características esenciales del Proterozoico son el rápido incremento del oxígeno en el

EL CLIMA

aire y la aparición de nuevos seres vivos, que hemos clasificado en un reino diferente al de las móneras, el reino de las protoctistas.

Estos nuevos seres vivos están formados por células revolucionarias, que hoy llamamos *eucariotas* (del griego *eu*, «superior», y *karion*, «núcleo»; es decir, con núcleo definido), en contraste con las que habían existido durante todo el Arqueozoico, las *procariotas* (del griego *pro*, «inferior», y *karion*, «núcleo»; es decir, sin núcleo). Se trata de un salto cualitativo impresionante. De hecho, en la década de 1990 los especialistas reagruparon a los seres vivos en otra clasificación más compleja que la de los cinco reinos, que a su vez había mejorado la vieja concepción de la biosfera dividida en animales y vegetales.

Los cinco reinos considerados hasta hace poco eran las móneras —que existen desde el Arqueozoico—, las protoctistas —que aparecen en el Proterozoico—, los hongos, las plantas y los animales —que aparecen en el eón siguiente, el Fanerozoico—. Pues bien, ahora la biología considera la existencia de tres grandes dominios, las arqueas, las bacterias y las eucarias, los dos primeros compuestos por células procariotas (sin núcleo) y el tercero por células eucariotas (con núcleo).

El dominio de las arqueas (*Archaea*, en latín) incluye una parte del reino de las móneras, las llamadas arqueobacterias (bacterias antiguas). Siempre han existido en los océanos, y se adaptan a veces a hábitats muy extremos. El dominio de las bacterias (*Bacteria*, en latín) incluye el resto del reino de las móneras, compuesto por las llamadas eubacterias (bacterias superiores). La diferencia con las anteriores tiene que ver con su metabolismo, la estructura de su material genético (grandes diferencias en el ARN de los ribosomas) y la diferente composición de su membrana celular. Este segundo dominio de las bacterias agrupa a los organismos más abundantes del planeta, por supuesto monocelulares, y con un tamaño de entre 0,5 y 5 micrómetros (milésimas de milímetro).

Queda, por último, el dominio de las eucarias (*Eukarya*, en griego), formado por células eucariotas (con núcleo) y que agrupa a los cuatro reinos restantes de la anterior clasificación: protoctistas, hongos, plantas y animales. Todos estos organismos pueden ser mo-

EL PASADO REMOTO

nocelulares, pero en su mayoría son muy complejos, con tejidos diferenciados formados por células muy distintas unas de otras pero que colaboran todas ellas a que el organismo multicelular funcione lo mejor posible. Todos los organismos eucariotas presentan semejanzas a nivel molecular (estructura de los lípidos, proteínas y genoma) y comparten un origen común. Se piensa que las primeras especies de protoctistas monocelulares, aparecidas al inicio del eón Proterozoico, fueron las primeras células especializadas de una enorme variedad posterior de seres vivos que más tarde darían lugar a los organismos más complejos (animales, plantas y hongos).

Aquellas primeras células con núcleo tenían una muy superior especialización, caracterizada esencialmente por preservar y agrupar el material genético en un conjunto interior separado del resto, el núcleo. Y todo ello dio lugar a un nuevo tipo de reproducción, la reproducción sexual. La vida, a comienzos del Proterozoico, no sólo fue capaz de inventar la contaminación —de oxígeno libre en el aire—, sino que también descubrió ¡el sexo!

Esas primeras células del nuevo reino comenzaron a proliferar de manera espectacular a mediados del eón, o sea, hace unos 1.500 millones de años, si bien los expertos no se ponen de acuerdo sobre la forma en que pudieron aparecer. Varias teorías se disputan la explicación, y quizá todas ellas tengan parte de razón.

Goza de gran popularidad la explicación de Lynn Margulis acerca de lo que ella denominó *simbiogénesis* o *endosimbiosis*, proceso mediante el cual dos células primitivas pudieron unirse asociando sus funciones. También pudo ocurrir que una célula con núcleo se uniera —ingiriéndola y luego digiriéndola, o bien asociándose con ella— a una célula sin núcleo pero con clorofila. Por ejemplo, un alga monocelular que absorbiera a una cianobacteria se convertiría en un alga verde, capaz de efectuar la fotosíntesis, pero con muchas más ventajas de tipo funcional y reproductivo que la bacteria inicial.

Es una teoría original, que en parte parece contradecir el «dogma» darwinista según el cual la evolución biológica se hizo por selección natural; es decir, sólo sobreviven y transmiten sus genes a la descendencia aquellas especies que se adaptan mejor al entorno hostil cuando hay algún cambio en dicho entorno. Por qué unos sí

EL CLIMA

y otros no, es algo que quizá dependa de la variabilidad genética al azar, por causa de mutaciones imprevistas o por otras razones.

La explicación de Margulis, extensamente explicada en un libro —todo un *bestseller* científico— aparecido en 1981 y titulado *Symbiosis in Cell Evolution*, podría valer para las algas con clorofila o para las células con mitocondrias (la mitocondria, que desempeña un papel esencial en el metabolismo energético de las células con núcleo, también contiene material genético, quizá procedente de una célula sin núcleo primitiva que se unió, en simbiosis, con otra célula más compleja; eso sería la *simbiogénesis*). Pero no significa que la evolución más «clásica», por adaptación y mutaciones, no haya funcionado también con éxito en muchos otros casos. ¿Por qué habrían de ser las explicaciones únicas y universales?

El caso es que en el Proterozoico conviven ya los tres dominios de los seres vivos, dos de ellos (arqueas y bacterias) con células elementales —habían sido los únicos seres vivos del planeta durante casi 1.400 millones de años— y el tercero (protocistas, que forman el primer reino de las eucarias) con células cada vez más especializadas y diversificadas en cuanto a sus formas, tamaños y funciones.

Las células eucariotas utilizan las mitocondrias para obtener y procesar la energía que necesitan para su metabolismo. Pero no todas lo hacen; algunas, como acabamos de ver, poseen clorofila que les permite obtener alimento y energía a través de la fotosíntesis. Es el caso del reino de las plantas, que aparecerán más tarde, ya en el Fanerozoico, y de muchas protocistas, algunas muy antiguas, del Proterozoico.

Por otra parte, los organismos que viven en ambientes sin oxígeno —hongos anaeróbicos (del reino de los hongos) y protozoos (del reino de las protocistas) tampoco usan mitocondrias; en ellos la energía la generan los *hidrogenosomas*, orgánulos que, aunque en muchos aspectos son similares a las mitocondrias, siguen un camino metabólico distinto: si aquéllas necesitan oxígeno para producir energía, los hidrogenosomas producen energía con hidrógeno, pero sin oxígeno.

Dejemos ya la evolución de los organismos vivientes, dejando constancia de un hecho indudable: la existencia de los dos tipos de

EL PASADO REMOTO

células (procariotas y eucariotas) hizo que los seres vivos —todavía exclusivamente marinos y microscópicos— adoptaran una cantidad de formas tan diferentes que podríamos comenzar a perdernos si empezamos a describirlas con cierto detalle. Además, muchas de esas formas de vida desaparecieron sin dejar rastro, aunque de algunas sí quedó algún resto fósil —por ejemplo, las diatomeas—, mientras que otras han sobrevivido hasta nuestros días.

En conjunto, las protoctistas incluyen a los protozoos y las algas; estas últimas se agruparon al final del eón Proterozoico para formar especies multicelulares, precursoras de las que luego existirían en los reinos de los hongos, los animales y las plantas. Y se reproducían utilizando la ventaja del sexo, una ventaja obvia debido a que la variabilidad genética se hace mucho mayor, y eso aumenta las posibilidades de supervivencia adaptativa si aparece una variación ambiental brusca como, por ejemplo, una glaciación o un cataclismo cósmico.

El eón Proterozoico tiene un periodo central, la Era Mesoproterozoica (entre 1.600 y 900 millones de años antes), en la que el oxígeno ya alcanza una concentración en el aire parecida a la actual, al tiempo que genera una incipiente capa de ozono en la atmósfera superior. Además, comenzaron a disminuir el dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua, por lo que se abrió el camino hacia los cambios climáticos extremos, y especialmente las glaciaciones.

No conocemos muy bien la evolución del clima en el eón Proterozoico, pero es casi seguro que ocurrió lo que sí sabemos que ha ocurrido en el eón más reciente, el Fanerozoico: las temperaturas probablemente fueron siempre más altas que hoy, excepto en el periodo Huroniano, cuando se produjeron numerosas glaciaciones intensas y frecuentes, que terminaron hace unos 2.300 millones de años.

Aquella glaciación huroniana fue la primera de la que se tiene constancia, y se cree que pudo llegar a helarse casi todo el planeta Tierra —los ingleses hablan de Snowball Earth, la Tierra Bola de Nieve—. Luego ya no habría más hielos hasta finales del eón, hace menos de mil millones de años. Una época muy interesante porque en ella hubo al menos tres intensas y prolongadas glaciaciones, que conocemos algo mejor, especialmente la última (llamada glaciación

EL CLIMA

eocámbrica). Algunos expertos le han dado a este largo periodo de climas helados el nombre de periodo Criogeniense; duró desde hace unos 850 a 620 millones de años, y quizá se dieron en ese largo intervalo de tiempo las glaciaciones más intensas que nunca haya sufrido el planeta; cada episodio gélido duraba varios millones de años y, como ya hemos visto, seguramente afectaba a todo el planeta.

No se sabe muy bien cómo pudo subsistir la vida en tan largo periodo (180 millones de años) en un planeta casi permanentemente helado. Algunos geólogos interpretan, a partir de restos sedimentarios de zonas que entonces estaban en latitudes tropicales, que aquellas fases fueron tan frías que incluso pudo haberse detenido casi totalmente la actividad biológica marina en esas zonas cálidas. De hecho, parece que el número de especies de plancton, por ejemplo, se redujo a menos de la mitad, para luego aumentar de forma explosiva al terminar las glaciaciones, en los inicios del nuevo eón, el Fanerozoico.

Lo más curioso es que aquellas glaciaciones tan intensas no impidieron que apareciera, quizá en un interludio momentáneamente más templado, un tipo de vida muy evolucionado, también de células eucariotas, llamado genéricamente *fauna de Ediacara* (Ediacara es una zona montañosa al sur de lo que hoy es Australia, donde aparecieron estos fósiles). Esa fauna, rica y diversificada, de seres con cuerpo blando pero de tamaño bastante grande, seguramente fue la primera forma de vida pluricelular que fructificó en el planeta. Parece que comenzó a aparecer hace entre unos 635 y 610 millones de años —con las técnicas actuales no parece que se pueda precisar mucho más, y suele adoptarse la cifra de 630 millones de años— y, aunque proliferaba y luego casi se extinguía en función del todavía variable y gélido clima de la época, probablemente desapareció definitivamente hace unos 542 millones de años, con el último y más intenso recrudecimiento de los hielos. Podríamos decir que aquellos seres vivos tuvieron mala suerte evolutiva. Quizá aparecieron en el lugar y el tiempo equivocados.

En todo caso, la enorme disminución de la biodiversidad en todo aquel periodo glacial de la transición entre los eones Proterozoico y Fanerozoico —incluida la aparición y posterior desaparición

EL PASADO REMOTO

ción de los seres vivos ediacarenses— puede considerarse como la primera Gran Extinción, precursora de las otras cinco que vendrían después, a lo largo del eón Fanerozoico, a un ritmo aproximado de una cada cien millones de años.

¿Qué produjo aquellos cambios? ¿Cómo era el reparto de tierras y continentes y cómo pudo todo ello influir en los cambios de clima? Algunos expertos proponen una teoría basada en unos supuestos *ciclos del supercontinente*. En esencia, eso significa que cada equis millones de años las tierras emergidas se van agrupando en un único continente, y luego vuelven a desmembrarse en piezas dispersas. Según esa teoría, ahora estaríamos en una fase de dispersión. Esta sucesión de supercontinentes, o pangeas («todas las tierras», en griego), es bien conocida en épocas relativamente recientes: sabemos que existió una pangea hace unos 300-280 millones de años, y duró hasta hace 240 millones de años. En realidad, sólo conocemos otras dos pangeas más, y de forma muy aproximada.

La primera quizá se formó hace unos 2.000 millones de años, a mediados del eón Proterozoico que estamos analizando. Esta Pangea 1 pudo durar entre 150 y 200 millones de años. El segundo supercontinente inició su concentración de tierras hace unos 1.100 millones de años, y se suele conocer como *Rodinia*, *Panotia* o Pangea 2; lo cierto es que quizá hubo una sucesión de supercontinentes y de continentes fragmentados durante un largo periodo de 500 millones de años. Y es probable que las intensas y prolongadas glaciaciones de hace 850 a 600 millones de años (periodo Criogeniense) se deban a que en esos momentos Pangea 2 estuviese dividida en dos grandes continentes concentrados en las zonas polares, lo que pudo provocar la aparición de climas continentales y gélidos. La cubierta de hielo casi general supone un enorme albedo (la Tierra se comporta en tal caso como un espejo helado), lo que impide que el calor del Sol pueda ejercer su efecto moderador...

Volviendo al clima gélido, con terribles y bruscos cambios, del final del eón Proterozoico, sigue siendo una gran incógnita el porqué de su persistencia y su intensidad. Y no sólo no está clara la causa de las glaciaciones —quizá relacionadas, en su inicio, con la agrupación de continentes en zonas polares— como, sobre todo, por qué

EL CLIMA

parecen haberse detenido bruscamente hace 542 millones de años, cuando ya se había iniciado la fragmentación de Pangea 1. Los modelos acerca del efecto invernadero —dióxido de carbono, metano y vapor de agua en aumento brusco— son difíciles de aplicar aquí: ¿cómo pudo aumentar casi de golpe, en un planeta prácticamente helado en su totalidad, la cantidad de esos gases en la atmósfera para reconvertirlo de nuevo en un lugar confortable para la vida?

La transición entre eones, cuando el clima siguió siendo muy frío pero luego se calentó muy deprisa tras el largo e intenso periodo de glaciaciones, propició la gran explosión de la biodiversidad del Cámbrico, un suceso histórico para la Biosfera del planeta Tierra. No es, pues, extraño que sea considerada por un autor tan cualificado como Francisco Anguita —uno de los más importantes planetólogos europeos—, como «el periodo climático más interesante de la historia del planeta». Quizá porque lo ignoramos casi todo, y nos intriga como pocas cosas...

De todos modos, es probable que hace unos 600 millones de años comenzara a escindirse definitivamente el macrocontinente Pangea 2, que acabó dando lugar, casi 300 millones de años más tarde, a cuatro grandes tierras, ya en el eón Fanerozoico: Gondwana (que había sido la zona central de Pangea 2), Laurentia (más o menos la actual América del Norte), Báltica (más o menos la actual Europa) y Siberia (buena parte de la actual Asia central).

Ya al final de la recién bautizada Era Ediacareense, hace 542 millones de años, es cuando cesan las glaciaciones, el planeta recupera temperaturas habitables, y la vida se diversifica de forma muy rápida en la ya citada explosión de biodiversidad del Cámbrico. En esos momentos predominaba el gran continente de Gondwana en las zonas tropicales (estaba formado por lo que hoy es África, Sudamérica, Australia, la Antártida, la India y parte de China); los demás (Laurentia, Báltica y Siberia) estaban aislados, cada uno por su lado. Hubo numerosos fenómenos de invasión oceánica, alternando con la aparición de nuevas tierras aluviales, lo que dio lugar a muchos mares interiores y extensas plataformas continentales (con escasa profundidad de agua). Quizá todo ello desempeñó un papel decisivo en la explosión de la biodiversidad.

EL PASADO REMOTO

PRINCIPALES SUCESOS EN EL EÓN PROTEROZOICO			
Millones de años antes	Geología	Biología	Clima
2.200			Glaciación huroniana
2.000	Supercontinente Pangea 1		
1.800		Aparecen las células eucariotas	
1.700	Se fragmenta Pangea 1		
1.200		Primeras algas pluricelulares	
1.100	Se forma Rodinia (Pangea 2)		
1.000			Los climas se enfrían
850			Glaciaciones intensas
700	Comienza a fracturarse Pangea 2		Más glaciaciones
670		Extinción en masa	Sigue el frío
630		Aparece la fauna de Ediacara	Frío algo menos gélido

EL CLIMA

En resumen, al terminar la época glacial más intensa de la historia del planeta —recordemos que las glaciaciones de esa transición entre eones se habían iniciado hace más de 800 millones de años y duraron hasta hace 542 millones de años— es cuando comienzan a aparecer de forma rápida la mayoría de los organismos pluricelulares y la mayor parte de los seres vivos de los que descendemos los que actualmente poblamos la Tierra.

Estamos ya en pleno eón Fanerozoico, que hoy podemos caracterizar gracias a la enorme abundancia y variedad de fósiles que demuestran la presencia masiva de vida pluricelular en un planeta habitable y con formas vivientes cada vez más diversificadas, primero bajo el agua, y enseguida también fuera de ella.

1.2.2. *El eón Fanerozoico*

La explosión de biodiversidad del Cámbrico se produjo de forma tan rápida que aún no tenemos una explicación plausible que explique los porqués y los cómo de semejante prodigio. Fue una aparición casi simultánea, a escala geológica (quizá en menos de un millón de años, cuando la vida llevaba existiendo desde hacía más de 3.000 millones de años), de múltiples especies de todos los reinos. El proceso se dio inicialmente sólo en el mar, que había sido la morada de la vida durante todo ese tiempo, pero, sorprendentemente, pronto acabó por dar el salto a tierra firme.

Las leyes de la evolución, que Darwin intuyó e introdujo, y que luego hemos ido conociendo mejor gracias a nuevas aportaciones cada vez más coincidentes, tienen aquí un excelente ejemplo de esa evolución por saltos que predicen algunos neodarwinistas, un proceso que se superpone probablemente a la evolución por mutaciones o adaptaciones progresivas. Porque se trata de procesos inevitablemente compatibles, desde luego; como ya hemos visto en alguna ocasión anterior, las teorías que explican el pasado de la vida no pueden ser unitarias y lineales, sino que son, con toda seguridad, multicausales.

El más reciente eón en la historia del planeta Tierra, el eón Fanerozoico, se divide tradicionalmente en tres eras: Paleozoico (anti-

EL PASADO REMOTO

guamente conocida como Era Primaria), Mesozoico (la antigua Era Secundaria) y Cenozoico (las antiguas Eras Terciaria y Cuaternaria). En la actualidad se tiende a añadir, antes del Paleozoico, la Era Ediacareense, hace entre unos 630 y 542 millones de años.

Aun así, este eón es mucho más breve que los tres anteriores: apenas abarca un 15 por ciento del tiempo total del planeta. Pero, como es obvio, es el que más información nos ha transmitido, por su relativa proximidad con el presente. Y, sobre todo, incluye nuestro pasado más próximo y, por supuesto, el presente que ahora nos preocupa.

Ya hemos visto que la fauna de Ediacara, en plena época glacial de transición entre los eones Proterozoico y Fanerozoico, fue un fugaz intento de la vida por diversificarse de forma extensa. En cuanto terminó el duro periodo glacial, volvió a repetirse el proceso, pero esta vez con éxito generalizado y duradero. En todo caso, parece obvio que hace algo más de 600 millones de años las condiciones evolutivas de la vida —especialmente, la transición de la célula procariota a la célula eucariota, y la posterior evolución y especialización de ésta— podían permitir ya el rápido desarrollo de seres cada vez más diferentes y complejos. Falló en la Era Ediacareense, pero repitió con éxito en el Cámbrico, al inicio de la Era Paleozoica.

En ese momento proseguía el proceso de fragmentación de Pangea 2, pero luego se iniciaría una nueva agrupación, la Pangea 3. Este proceso terminó hace unos 300 millones de años; pero la nueva Pangea, que es la que mejor conocemos, apenas duró 50 millones de años. Su final coincide con una terrible extinción de la biodiversidad, a causa de un cambio climático bastante brusco, quizá hacia el calor y la sequía que se habían iniciado unos cuantos millones de años antes y que se agudizaron hace 250 millones de años.

Este capítulo se detendrá al llegar al periodo Cuaternario, hace algo menos de dos millones de años, cuando la línea de los homínidos era ya única, tras haberse escindido netamente de la línea de nuestros primos hermanos, los chimpancés, hace unos cinco o seis millones de años. Pero la aparición de los humanos, y antes de ellos la de los homínidos, los primates y los mamíferos, no ocurrió porque sí, sino a consecuencia de muy diversos acontecimientos geoló-

EL CLIMA

gicos y biológicos, condicionados a su vez por las variaciones del clima. Y esto es precisamente lo que más nos interesa aquí, por supuesto.

Veamos, pues, someramente, cómo fue la evolución geológica desde la Era Ediacarense, hace 630 millones de años, hasta el Cuaternario, hace unos dos millones de años. También analizaremos cómo evolucionó la vida a lo largo de este eón hasta dar lugar, en una de sus líneas evolutivas, a los homínidos. Y por último, inevitablemente relacionados con ambas evoluciones, la geológica y la biológica —y actuando probablemente como el gran condicionante de todas las extinciones, apariciones y evoluciones de la biodiversidad—, veremos cómo fueron los cambios de clima en el planeta.

Desde el punto de vista estrictamente geológico, la dispersión de Pangea 2 tuvo un efecto sin duda interesante para los estudiosos de hoy, pero al mismo tiempo muy desafortunado: las colisiones entre los bloques litosféricos que luego volverían a reunirse para formar lo que acabaría siendo Pangea 3, la más reciente, reciclaron parte de las rocas que constituían las antiguas masas continentales. Y esas rocas, en dicho proceso, desaparecieron fundiéndose de nuevo en el interior de la Tierra, lo que borró del registro geológico casi toda la información sobre los anteriores movimientos de las placas de la corteza terrestre en la mayor parte de las regiones del planeta. Lo que hemos narrado hasta ahora lo sabemos, pues, de forma fragmentada y mucho menos precisa que lo que hemos ido aprendiendo acerca de los periodos más recientes que ahora veremos.

El caso es que hace 250 millones de años, y tras cientos de millones de años de fragmentación y posterior reagrupamiento, aparece ese nuevo supercontinente, Pangea 3. Pero la cosa no se detuvo ahí. Después de unos 50 millones de años de cierta estabilidad, esta última Pangea comenzó a su vez a fragmentarse. El mismo proceso geológico en perpetuo movimiento que hoy observamos (y que se hace patente en la superficie del planeta debido a que las placas de la corteza «flotan» sobre el magma del manto semilíquido, y se mueven, chocan, se hunden y reaparecen en un proceso tan lento como inexorable) ya existía en aquellos tiempos y fue el responsable de la fragmentación de aquel supercontinente, como ya había ocurrido

EL PASADO REMOTO

con Pangea 1 y 2. Estos procesos son lentísimos a escala humana, que abarca años, como mucho siglos; pero son bastante rápidos cuando hablamos de millones de años.

Por cierto, como las cosas del planeta van a seguir más o menos igual, es más que probable que vuelva a formarse una Pangea 3 dentro de unos 50 a 100 millones de años. No sé quién va a estar por aquí para contarlos; son muchísimos años, inimaginables a nuestra escala. El ritmo de los procesos que nos interesan a los seres humanos nada tiene que ver con estos otros ritmos geológicos; la historia del planeta, de sus tierras y de sus climas que estamos narrando ha transcurrido a lo largo de periodos de tiempo imposibles de asimilar y de comparar con los sucesos habituales de nuestra vida cotidiana. Cuando hablamos de brutales cambios climáticos, sin duda fueron eso, brutales, pero en realidad duraron incluso uno o varios millones de años; y eso, obviamente, nada tiene que ver con el cambio climático que hoy nos preocupa.

En todo caso, basta consignar aquí que si hablamos de choques entre bloques de la corteza terrestre, eso supone, automáticamente, una renovación de esa corteza: una parte se hunde bajo tierra, en el manto magmático, mientras que otra nueva se va creando por salida al exterior de parte de ese mismo manto —a través de los volcanes, tanto en tierra firme como bajo los océanos—. En esos choques se producen arrugas en el suelo: es el relieve. Y el proceso se denomina *orogenia*, es decir, formación de las montañas. Las zonas más afectadas por movimientos orogénicos son también las más inestables, y en ellas abundan los volcanes y los terremotos; suelen ser las zonas de frontera entre las grandes placas de la corteza.

A lo largo del eón Fanerozoico se produjeron al menos tres grandes —decimos grandes porque afectaron a casi todo el planeta— procesos de orogenia: caledoniano, herciniano y alpino. Por supuesto, también hubo entre medias otros procesos de menor extensión, que incidieron sobre regiones más localizadas.

Conviene precisar que hoy sigue habiendo procesos orogénicos similares. De hecho, parece como si la orogenia alpina no se hubiera acabado aún. Por eso sigue siendo muy activo el choque entre placas de la litosfera, y allí donde esas placas están colisionando, y creando

EL CLIMA

o destruyendo zonas montañosas, es donde más frecuentes son los volcanes y terremotos que de vez en cuando salpican las páginas de actualidad de los periódicos: el llamado «cinturón de fuego del Pacífico», la zona de choque entre el sur de Europa y África, y así sucesivamente.

La última de las orogenias del Fanerozoico, la alpina, es la más conocida y también la más visible: las más altas montañas actuales son un reflejo fiel de su presencia. Cuando se fragmentó Pangea 3, hace unos 200 millones de años, nuevas montañas comenzaron a aparecer a causa de los distintos choques entre las placas resultantes de dicha fragmentación. Esas placas, o bien rozaban entre sí, o se encastraban unas en otras, o se alejaban unas de otras; todo ello daba, y sigue dando, lugar a la aparición de una nueva corteza continental de nuevos relieves.

Así, los Andes son el producto de un hundimiento —los geólogos dicen «subducción»— de la corteza oceánica pacífica bajo la corteza continental de América del Sur. Las montañas Rocosas se deben al roce con frecuentes choques entre la placa del Pacífico y la placa americana del norte. El Himalaya es fruto del hundimiento de la placa de la India bajo la placa del Tíbet. La Sierra Nevada española es el reflejo del choque de la placa africana contra la europea, y así sucesivamente.

La orogenia alpina se inició de forma aletargada en el Jurásico, y se recrudeció en la Era Cenozoica (Terciaria) hace unos 60 millones de años. En el 80 por ciento de la superficie terrestre, las rocas que existen actualmente se formaron durante esta orogenia, aunque en muchas zonas se han reciclado y reactivado los materiales formados anteriormente. Este proceso los ha deformado y ha borrado en parte las huellas de orogenias más antiguas. Es el caso de buena parte de nuestros Pirineos y del macizo ibérico, sin ir más lejos, cuyo origen es herciniano, pero que luego fueron modificados y levantados de nuevo por plegamientos alpinos.

El hecho de que la orogenia alpina no parezca haberse detenido resulta de enorme interés: por ejemplo, en algunas regiones del mundo, allí precisamente donde es mayor la actividad geológica —costas del Pacífico en América o en Asia, o bien, ya más cerca de

EL PASADO REMOTO

nosotros, buena parte de las costas europea y africana al norte y al sur del Mediterráneo—, la orogenia hace que la costa se levante a un ritmo de hasta un centímetro por año, es decir, un metro por siglo. Esto significa que, si por causa del cambio climático actual, llega a subir el nivel del mar entre veinte y sesenta centímetros, en estos lugares no sólo no subiría el mar sino que bajaría, porque la tierra se levanta más deprisa de lo que sube el mar. De hecho, Colón salió del puerto de Palos de la Frontera; y hoy, más de cinco siglos después, ese puerto está lejos del mar...

En España, el Mediterráneo ya existía hace más de diez millones de años, pero pudo secarse casi del todo hace 6,5 millones de años, al elevarse la zona del actual estrecho de Gibraltar —es la llamada «crisis salina del Mesiniense», señalada por los grandes depósitos de sal en el golfo de Mesina que pudieron formarse al secarse parcial o totalmente el mar—. Por cierto, volvió a rellenarse hace cinco millones de años, cuando el estrecho reapareció y comunicó de nuevo el Atlántico con el Mare Nostrum. En el futuro, el Mediterráneo parece destinado a desaparecer en apenas cincuenta millones de años, al unirse completamente África y Europa. Por su parte, las dos Américas volverán a separarse, Australia emigrará hacia el norte y se unirá a buena parte del continente asiático del sur —desde Indochina a Japón—, que a su vez se separará del resto de Eurasia. Y quizá el polo Norte sea un polo continental, al verse invadido por la actual Siberia. Mientras, la Antártida parece que seguirá en su lugar, en torno al polo Sur. Todo esto, recordémoslo, podría ocurrir dentro de unos cincuenta millones de años... Ninguno de nosotros podrá dar testimonio de que eso será así; pero es lo que podemos predecir a la luz de lo que vamos sabiendo.

En cuanto a los seres vivos, la evolución durante el Fanerozoico es igualmente apasionante. Si la historia del relieve condiciona nuestro hábitat pasado, presente y futuro, la historia de las especies vivientes explica sencillamente por qué estamos aquí y por qué somos hoy lo que somos.

Excepto lo poco que hemos descubierto de la fauna de Ediacara, hace 630 millones de años, y lo que creemos conocer de la explosión de biodiversidad del Cámbrico, hace unos 540 millones de

EL CLIMA

años, poco sabemos de los seres vivos complejos de las épocas primeras del eón Fanerozoico. Aunque disponemos de algunos fósiles, no sabemos lo bastante como para completar de manera precisa el panorama de una vida que muy pronto se fue haciendo cada vez más variada, y con numerosos representantes en los cinco grandes reinos.

Es probable que en esos momentos, y tras las glaciaciones que marcaron el final del eón Proterozoico, algunos ambientes oceánicos comenzaran a estar superpoblados. Y eso pudo originar la aparición de especies cada vez más diversas, adaptadas a muy diferentes ambientes. Luego, durante la glaciación que marca la transición entre el Ordovícico y el Silúrico —entre unos 450 y 430 millones de años antes—, se produjo una de esas tristemente famosas «extinciones» de la biodiversidad. La vida pudo acabar casi como la fauna de Ediacara, literalmente muerta de frío. Porque desaparecieron el 85 por ciento de las especies entonces existentes... Hay evidencias en el Sahara actual de aquella glaciación: un espeso manto de hielo cubrió esa zona de África sobre una superficie de casi diez millones de kilómetros cuadrados.

Por fortuna para los seres vivos, los hielos duraron menos tiempo que en el Ediacareense, y la vida volvió si cabe con mayor fuerza que antes, esta vez atreviéndose a salir, por fin, del mar. Las primeras plantas terrestres datan de hace 400 millones de años, y algo más tarde aparecieron los primeros animales anfibios y los primeros insectos.

¿Cómo pudo ser esa importantísima transición de la vida marina a la vida terrestre? Al abordar la cuestión de la conquista de la tierra firme, uno se imagina una especie de invasión alienígena en forma de gusanos, o anfibios, o lo que sea, que salen del mar en unas horas y van conquistando posiciones en la costa. Un desembarco en toda regla, vamos. Y, claro, no fue así de ninguna manera. Aunque seamos muchos los que podamos emplear, como una licencia literaria, una terminología equívoca que evoca sucesos rápidos y propios de nuestro mundo.

Véase la muestra, extraída de un libro de texto que describe la transición de la vida marina a la vida terrestre: «Quizá algunas especies, intrépidas y aventureras, exploraron nuevos hábitats y se aden-

EL PASADO REMOTO

traron en el medio terrestre. Es probable que el tránsito desde las aguas marinas a tierra firme se produjese, en muchas ocasiones, pasando por etapas intermedias de agua dulce (ríos, lagos, pantanos...). Es probable también que, en aquellas épocas, la concentración de oxígeno en la atmósfera y la capa de ozono ya fuese como en la actualidad, y esto estimuló esta conquista».

«Especies intrépidas y aventureras», «exploradores que se adentran en territorio desconocido», «conquista»... La terminología se parece mucho a la de una película de aventuras. Pero la realidad no fue así. El proceso, a escala geológica, fue bastante corto, pero aun así debió de tardar cientos de miles, incluso millones, de años. Y en todo ese tiempo, muchas especies perecerían y desaparecerían, mientras que otras quizá mutaron al azar y con ello pudieron sobrevivir en un medio hasta entonces hostil: el aire, sobre la tierra emergida.

Los primeros grupos de organismos pluricelulares que realizaron ese tránsito fueron algunos vegetales, algunos hongos y, enseguida, ciertos animales, básicamente artrópodos y vertebrados. Se sabe que las primeras plantas, primitivas y de tipo herbáceo, aparecieron hace unos 440 millones de años, al comienzo del Silúrico, probablemente derivadas de algunas algas verdes. Cuando llegaron a tierra firme, hace unos 400 millones de años, se expandieron y se diversificaron con cierta facilidad. Y su evolución dio lugar a grupos de plantas cada vez más complejas.

Puede que los hongos colaboraran en la conquista de la tierra por las plantas, ya que estos organismos aparecen en las raíces de muchos vegetales fósiles, con un metabolismo seguramente asociado al suyo. La ayuda es similar a la que actualmente se prestan mutuamente muchas plantas y muchos hongos, donde unos proporcionan lo que les falta a los otros, como, por ejemplo, nutrientes o humedad. No está claro si los primeros hongos terrestres fueron socios de las primeras plantas o si conquistaron la tierra por su cuenta. No hay fósiles que aclaren el asunto, y quizá los primeros hongos procedían, como los primeros vegetales, de determinadas algas, en este caso sin clorofila.

La aparición de plantas en ambientes terrestres próximos al agua —ríos, lagos, costas— quizá facilitó la llegada de animales ma-

EL CLIMA

rinos que pudieron vivir en ese ambiente mixto agua-aire-tierra. Hoy los animales que mejor viven en ese medio son moluscos, gusanos y anfibios en general. Pero, al parecer, fueron los artrópodos los primeros en iniciar la conquista —no es fácil sustraerse al lenguaje «aventurero», como puede verse—. Estos animales fueron probablemente antecesores de los ciempiés y especies similares, y poseían un ventajoso sistema de locomoción que les permitía alejarse para encontrar alimento, y volver a acercarse al agua en caso de problemas.

Luego, cuando las plantas adquirieron mayor porte, algunos de estos animales pudieron evolucionar lentamente hasta dar lugar a los insectos, algunos de ellos incluso capaces de volar y alcanzar la copa de los árboles. En los gigantescos bosques del Carbonífero, hace más de 300 millones de años, algunos de estos insectos desarrollaron formas gigantescas —cucarachas, libélulas— que hoy podrían aterrizarlos.

Los vertebrados tardaron más en conquistar tierra firme. Los primeros fueron los precursores de las ranas y salamandras actuales; estos primeros anfibios aparecieron en el Devónico, hace unos 380 millones de años, y seguramente procedían de algún tipo de pez habitante de aguas someras. A lo mejor esas aguas se secaban de vez en cuando, y para sobrevivir algunos de ellos pudieron haber adquirido por azar mutaciones que les proporcionaran armas para «respirar» el aire, es decir, para obtener alguna ventaja de la capacidad oxidante del oxígeno. Así fue como los anfibios se extendieron por los continentes y acabaron diversificándose de manera notable; en el Triásico, hace poco más de 200 millones de años, llegaron a tener tamaños descomunales, de varios metros de longitud. Más tarde, a partir del Jurásico solamente quedaron los ancestros de los anfibios actuales, que ya eran muy similares a los que hoy vemos.

Vistos los cambios de clima que debieron de afrontar, y que son más agudos en tierra firme que en el mar, las plantas, los hongos y los animales tuvieron que «inventar» determinadas «estrategias» de adaptación. Utilizamos las comillas tipográficas para indicar que desde luego no se trata de estrategias ni de inventos, sino de mutaciones muy lentas, que tienen éxito o no generación tras generación,

EL PASADO REMOTO

hasta dar con una especie nueva que posee elementos que ayudan a su supervivencia. Pero contando la historia aceleradamente, como a cámara rápida, parece que la vida «supo» cómo adaptarse y adoptar estrategias defensivas. Idea falsa, porque no tiene en cuenta la inmensa cantidad de especies que no pudieron sobrevivir y que, claro, ni conocemos ni tenemos posibilidad alguna de conocer porque desaparecieron sin dejar rastro.

Estos «inventos» —seguiremos utilizando las comillas como señal de alerta mental ante el término— fueron, por ejemplo, impermeabilizantes para la piel, como las escamas en los reptiles, las plumas en las aves o los pelos en los mamíferos. En cuanto a la reproducción, otros «inventos» fueron la fecundación interna y la copulación, o bien la aparición de los huevos. Y en las plantas, el polen y, más adelante, las flores.

Por cierto, fue una suerte para nuestros antepasados mamíferos que un meteorito de gran tamaño acabara con el imperio de los grandes reptiles a finales del Cretácico. Aquellos pequeños mamíferos, que sobrevivían a duras penas en un mundo colonizado por los dinosaurios, tenían apenas el tamaño de los actuales ratones, eran merodeadores nocturnos y malvivían sin oportunidades para prosperar. Con la catástrofe de hace 65 millones de años y el brutal cambio de clima subsiguiente, estos pequeños animales tuvieron su gran oportunidad porque poseían ventajas adaptativas de las que carecían los reptiles; por ejemplo, su temperatura constante, su piel protegida por el pelo, el viviparismo (las crías crecen en el útero materno, lo que evita el inconveniente de los huevos), la lactancia (que permite la supervivencia de las crías en épocas de escasez), la cabeza grande respecto al cuerpo (mayor capacidad cerebral), dientes complejos y especializados, un oído muy desarrollado, y así sucesivamente. No quiere decir esto que todos los mamíferos del Cretácico tuvieran todas esas cosas, y que todos los dinosaurios y reptiles carecieran de todas ellas. Pero, en promedio, los mamíferos estaban mejor dotados de esas características. Y por eso algunos de ellos sobrevivieron. Muy pocos de los grandes saurios pudieron hacerlo; quizá sólo los cocodrilos, que habían aparecido hace unos 200 millones de años.

EL CLIMA

De todos modos, estos procesos evolutivos transcurrieron en un ambiente que no fue plácido en absoluto. Hace 355 millones de años ocurrió la segunda Gran Extinción del Fanerozoico, al final del Devónico. Desapareció un 75 por ciento de las especies existentes, el 70 por ciento de los invertebrados y la inmensa mayoría de los peces, y no se sabe muy bien por qué causa...

La tercera Gran Extinción fue la peor de todas; se produjo hace 250 millones de años, en la transición entre el Pérmico y el Triásico —que marca el paso de la antigua Era Primaria a la Secundaria, hoy Eras Paleozoica y Mesozoica—. Se piensa que desaparecieron el 90 por ciento de las especies marinas, quizá algo más de la mayoría de las especies terrestres, y prácticamente todos los anfibios. El resultado fue que éstos fueron sustituidos por los reptiles, que poseían mejores medios de locomoción y tenían escamas para protegerse de las agresiones climáticas. La evolución propició por aquel entonces el nuevo «invento» del huevo con cáscara dura: ya era posible reproducirse en tierra firme, sin necesitar para nada el agua. Muchos reptiles viven hoy en zonas desérticas gracias a ese hallazgo.

Aquel cataclismo, probablemente cósmico —el choque de un meteorito o un cometa—, sumió a un planeta por entonces cálido y húmedo en una etapa de relativa opacidad atmosférica, con sequías brutales y temperaturas en brusco descenso. Hay expertos que se atreven a pensar que esta tragedia ocurrió no ya en pocos miles de años o incluso siglos, sino quizá en apenas unos cuantos días o semanas. Quizá sea ésa la mejor prueba de un cataclismo de origen espacial.

La vida se recuperó a duras penas; durante todo el Triásico, de 250 a 208 millones de años a esta parte, el clima fue muy seco y bastante caluroso. El continente casi único, Pangea 3, estaba iniciando ya su fragmentación, pero aún abarcaba zonas ecuatoriales y tropicales, rodeado por un enorme océano único, la Pantalasa (en griego, «el mar total»). Todo eso originó en el interior de Pangea un clima árido que no era precisamente favorable para la vida, al menos en tierra firme. Eso sí, en las zonas costeras seguramente las cosas estuvieron un poco mejor, y allí fue donde la vida volvió una vez más por sus fueros, como había ocurrido en el Silúrico, y luego sobre todo en el Carbonífero.

EL PASADO REMOTO

Pero al final de este periodo, cuando Pangea 3 ya se vuelve a fragmentar, ocurre una nueva extinción de las especies que habían logrado sobrevivir y evolucionar. Esta cuarta extinción, hace poco más de 200 millones de años, extinguió a casi tres de cada cuatro seres vivos y marca la transición entre el Triásico y el Jurásico.

Luego, vuelta a empezar. El clima se hizo cálido y húmedo en buena parte del planeta, y volvieron a proliferar plantas y animales de todos los tipos. El Jurásico y el Cretácico fueron épocas de esplendor para las grandes plantas y los animales gigantes. En el Jurásico aparecen las primeras aves, hace unos 180 millones de años, y se diversifican los mamíferos, generalmente de tamaño pequeño. Ese mundo estaba dominado por reptiles, muchos de enorme tamaño: los pterosaurios eran dueños del cielo; los ictiosaurios, los plesiosaurios y los mosasaurios eran dueños —casi absolutos y ferozmente depredadores— del mar, y los dinosaurios eran los reyes de tierra firme.

Y así fue hasta la siguiente extinción, la quinta y, por ahora, la última. Ocurrió hace 65 millones de años, muy probablemente por el choque con la Tierra de un cometa o un gran meteorito en la zona del actual golfo de México. Desapareció el 70 por ciento de los seres vivos, entre ellos los grandes saurios. En el mar desaparecieron los ammonites y los grandes reptiles, y en tierra sucumbieron todos los animales de tamaño grande o mediano (sólo aguantaron los más pequeños, de menos de veinticinco kilos).

Con todos estos cambios y estas masivas extinciones, parece obvio que nunca llegaremos a conocer todos los seres vivos que han existido antes de nuestra era. Se estima que el 99 por ciento de las especies que han existido en el planeta ya se han extinguido, por razones evolutivas «normales», pero sobre todo a causa de esas catástrofes puntuales. De ese 99 por ciento de especies vivientes, no tenemos la más mínima noticia. Y, a pesar de todo, lo más probable es que hoy día existan más tipos diferentes de seres vivos que en cualquier otro momento de la historia del planeta. La evolución hacia una complejidad biológica creciente, tras el inicial fracaso de aquella pionera fauna ediacareense, parece imparable; y eso, a pesar de las extinciones catastróficas. Parece como si la vida, una vez iniciada, y

EL CLIMA

siempre que tenga tiempo por delante, fuera realmente imposible de eliminar.

La tesis, romántica, y después de todo un poco ingenua, fue enunciada inicialmente por el gran ecólogo Vernadski, padre entre otros del término «Biosfera». Luego fue retomada con gran éxito mediático por James Lovelock, químico y médico experto en cuestiones espaciales, que mientras trabajaba para la NASA ideó su «Hipótesis Gea», comparando la vida en el planeta con una especie de superorganismo que se adapta constantemente a los cambios geológicos y climáticos, sacrificando determinadas partes para salvar otras. Por cierto, el mundo hispano suele decir «Gaia» en lugar de «Gea», nombre este último de la diosa de la Tierra de los romanos —de ahí provienen geología, geodesia, geometría...—. Decir Gaia es un anglicismo un poco paleta: *ai* en griego suena, como en francés, *e*. O sea, que se escribe en griego Gaia, pero se pronuncia Gea. A nadie se le ocurre decir que en el colegio enseñan gaiometría o gaiología...

En cuanto a las extinciones, las hipótesis barajadas, sin prueba alguna por ahora, tienen mucho que ver con causas astronómicas; por ejemplo, que la Tierra y todo el Sistema Solar, que viajan en torno al centro de la galaxia dándole una vuelta cada 200 millones de años, quizá pasan regularmente por zonas más densas de polvo y materia interestelar, capaces de variar casi de golpe las condiciones propicias para la vida en la Tierra. Otra explicación apelaría a cambios climáticos derivados de un movimiento pendular hacia arriba y hacia abajo (norte-sur), no del todo demostrado en realidad, de todo el Sistema Solar en su viaje por la galaxia. O, simplemente, que de las zonas periféricas de nuestro sistema planetario, más allá de Plutón, salen de vez en cuando grandes masas rocosas heladas que luego viajan hacia el Sol; son los cometas, que muy difícilmente colisionan con la Tierra pero, aun así, una vez cada cien millones de años en promedio. Porque parece que hemos asistido a por lo menos seis grandes extinciones —incluyendo la de Ediacara— en los últimos 630 millones de años, es decir, una extinción cada cien millones de años más o menos.

¿Cuándo llegará la próxima? Muchos opinan que ya está aquí; y que la causa nada tiene que ver esta vez con el Cosmos, sino con el

EL PASADO REMOTO

Homo sapiens. Porque podríamos muy bien ser nosotros los causantes de esa nueva Gran Extinción, a causa de la industrialización salvaje a la que estamos sometiendo el planeta y la esquilma de toda suerte de recursos naturales para nuestro provecho, sin repartir con otros humanos más pobres y sin reponer lo que estamos gastando. Pero, obviamente, el riesgo cósmico sigue existiendo, si bien puede ser inminente o tardar 35 millones de años en llegar (el último cataclismo ocurrió hace 65 millones de años).

El análisis de la evolución de la vida en este eón Fanerozoico —la vida anterior era sólo marina, apenas la conocemos y, además, presentaba muy escasa biodiversidad— demuestra que una especie puede esperar vivir, en promedio, no más de diez millones de años. En el caso de los mamíferos, que somos relativamente recientes en esto de la biodiversidad, esa media baja a menos de cinco millones de años. Al desaparecer, las especies dan lugar a otras nuevas. Y éste es un proceso en general lento y paulatino; excepto durante la explosión de vida al iniciarse el Cámbrico, que encierra aún muchas incógnitas, y desde luego en las grandes extinciones, cuyas causas creemos conocer bastante mejor.

El caso es que si actualmente los humanos somos mamíferos inteligentes, tecnológicos y hasta dañinos para el planeta, en un pasado remoto —como el de hace cien millones de años, por ejemplo— había muchos más reptiles que mamíferos. Hay quien piensa en una competición entre ambos grupos, pero lo cierto es que, como ya hemos visto, durante la Era Paleozoica abundaron los terápsidos (los reptiles precursores de los mamíferos), pero no sobrevivieron más que con enorme dificultad a la brusca transición con la Era Mesozoica. En cambio, en ese momento aparecieron, y luego acabaron dominándolo todo, los arcosaurios (grandes reptiles, incluyendo a los dinosaurios). Y en la siguiente transición brutal, hace 65 millones de años, los grandes saurios, que parecían dominarlo todo, desaparecieron; y, en cambio, los mamíferos herederos de los terápsidos volvieron a reaparecer para dominar la escena biológica, hasta el punto de que en su rápida evolución acabaron dando una especie inteligente, nosotros.

Algunos expertos denominan a este suceso «la venganza de los terápsidos», y no les falta razón. De no haberse dado semejante pro-

EL CLIMA

ceso, es probable que la inteligencia hubiera aparecido de todos modos, sí; pero no en los mamíferos, sino en los reptiles. Los humanos no hubiéramos sido entonces parientes de los monos, sino de los lagartos...

Y a todo esto, ¿cómo transcurrieron los climas a lo largo de este eón, caracterizado como hemos visto por la proliferación de vida en el mar, y luego ya en los cielos y en tierra firme?

Los expertos creen que, en los últimos 500 millones de años, el contenido de oxígeno en el aire terrestre ha ido oscilando entre un 15 y un 35 por ciento (ahora es del 21 por ciento). Ese máximo del 35 por ciento se debió de alcanzar durante el Carbonífero, hace unos 300 millones de años, y luego debió de bajar bruscamente al 15 por ciento durante la brutal transición entre la Era Paleozoica y la Era Mesozoica (el paso de la antigua Era Primaria a la Secundaria), hace 250 millones de años. Parece indudable que estas variaciones tuvieron mucho que ver con la proliferación de plantas verdes —el Carbonífero dio lugar durante muchos millones de años a una flora muy variada, de gran tamaño, en la que destacaban enormes árboles leñosos—, a su vez propiciadas por un clima cálido y húmedo, con una enorme abundancia en la atmósfera de dióxido de carbono. Esas plantas acabaron capturando buena parte del carbono que había en el aire en forma de dióxido, y ese carbono quedó luego enterrado bajo tierra durante tres centenares de millones de años. Hoy lo extraemos en forma de carbón.

O sea, que, al final del Carbonífero, hace algo menos de 300 millones de años, esa actividad fotosintética de los grandes vegetales había extraído del aire buena parte del carbono atmosférico, haciendo que los niveles de dióxido de carbono fueran en disminución, desde los niveles altísimos alcanzados a mediados de ese periodo —se calcula que en torno a 1.500 ppm (partes por millón, lo que equivale en este caso a un 1,5 por ciento)— y que fueron los responsables de las altas temperaturas de esa época (en torno a los 23-25 grados), hasta alcanzar condiciones semejantes a las actuales —hoy tenemos 375 ppm y una temperatura media de 15,5 grados.

Semejante descenso no podía más que terminar en una glaciación, la que marca la transición entre el Carbonífero y el Pérmico.

EL PASADO REMOTO

Luego, durante el Pérmico, el clima se recuperó poco a poco, aunque sin volver a subir tanto como anteriormente porque las plantas verdes no alcanzaron el desarrollo que habían tenido, ni en el mar pudo proliferar el plancton clorofílico.

La historia del clima, como vemos, está casi indisolublemente ligada a la historia de la vida.

La catástrofe gigantesca que señala la transición entre la Era Paleozoica (Primaria) y la Era Mesozoica (Secundaria) —probablemente fue un cataclismo cósmico— supone, asimismo, un nuevo y muy brusco cambio de clima. La oscuridad por el polvo y el humo redujo la insolación y, por tanto, la fotosíntesis por un lado, y las temperaturas por otro. Ese frenazo fotosintético originó, claro, un aumento rápido del dióxido de carbono; después, según iba transcurriendo el Triásico, tras la sedimentación del polvo y el humo, ese exceso de gases invernadero fue produciendo un rápido calentamiento. Al tiempo, Pangea 2 se iba fracturando, haciendo que el clima se hiciese más variado, y sobre todo más lluvioso y más caluroso.

Es posible que, por esa causa, toda la Era Mesozoica (Secundaria) estuviera libre de glaciaciones y con un clima más o menos estable y en general cálido. Al principio (Triásico), más bien seco y con biodiversidad en lento crecimiento; y luego (Jurásico y Cretácico), con un clima más uniforme y cada vez más cálido y húmedo, porque, al fracturarse Pangea, fueron más abundantes las zonas marítimas y húmedas y, en cambio, hubo menos valores extremos, propios de las zonas continentales.

En suma, aunque en los polos hacía frío —aunque menos que hoy—, en las zonas tropicales y templadas había un calor y una humedad muy superiores a las actuales. Todo ello generó una vegetación variada y abundante, aunque no tan exuberante como la del Carbonífero, y una fauna igualmente variada y que en algunas especies alcanzó tamaños gigantescos (dinosaurios y otros animales).

Durante el Cretácico, el último periodo de esta Era, hace unos cien millones de años, la temperatura media del planeta era hasta diez grados superior a la actual (quizá en torno a los veinticinco grados de media), muy probablemente por esas dos causas concretas:

EL CLIMA

la elevada concentración de gases de efecto invernadero y una mayor frecuencia de climas oceánicos, húmedos y cálidos.

Las variaciones de la concentración de dióxido de carbono se conocen mal, pero se estima que con cierta frecuencia se sobrepasaron los 1.000 ppm, y algunos expertos aventuran para esa época cifras en torno a los 3.000. Se sabe que las plantas con flores, que tanto proliferaron por aquella época, alcanzan su mayor eficiencia fotosintética cuando esa concentración es algo superior a los 1.000 ppm; quizá ésa es la cifra más probable, entre 1.000 y 1.500 ppm.

Es posible, además, que hubiera exceso de dióxido de carbono a causa de la intensa actividad volcánica derivada del movimiento de las placas continentales en las que se había fragmentado Pangea 2. Por otra parte, también el vapor de agua aumentó mucho en el aire terrestre debido al clima húmedo; como ya hemos dicho, y sin duda tendremos ocasión más adelante de analizarlo despacio, el vapor de agua es el más eficaz de los gases invernadero... cuando está en forma de gas, o sea, invisible. Si se condensa en agua, aunque sea en minúsculas gotas (nubes, niebla), entonces se comporta como un freno al efecto invernadero.

Que haya mucho vapor de agua en el aire depende lógicamente del aporte acuoso (evaporación), aunque también de la temperatura del aire: cuanto más caliente, más capacidad para albergar agua en forma de gas. En el Cretácico es indudable que había mucha evaporación —muchos mares entre los continentes— y, además, un aire muy caliente capaz de almacenar ese vapor en forma de gas.

Conclusión: climas cálidos y, por tanto, biodiversidad en plena proliferación. Quizá el clima no llegó a ser el del Carbonífero (aunque también se produjo carbón en el Cretácico), pero, en cambio, existió una fauna y una flora probablemente más rica y variada.

Al final de este periodo, poco antes del cataclismo que señaló su final hace 65 millones de años, los continentes se reagruparon en parte, y los mares interiores se fueron vaciando, dejando paso a extensas zonas de lagunas y pantanos que capturaban y enterraban abundante materia vegetal. En ese proceso se volvía a «secuestrar» mucho carbono del aire —fijado por esas plantas verdes—, lo que hizo descender la concentración de dióxido de carbono. Al mismo tiempo,

EL PASADO REMOTO

los climas más continentales también redujeron los aportes de vapor de agua y aparecieron de manera cada vez más frecuente descensos de temperaturas y, por tanto, disminución consecuente del vapor de agua.

¿Una nueva glaciación a la vista? Pues no, pero porque ocurrió un evento fortuito aunque no infrecuente en esta escala de tiempo de muchos millones de años: el choque de un meteorito con la Tierra. Una nueva extinción de biodiversidad a la vista. Ocurrió hace 65 millones de años, y señaló el fin de la Era Mesozoica (Secundaria) y el inicio de la Cenozoica (Era Terciaria).

De nuevo, un cambio climático devastador se abatió sobre el planeta de forma brusca y generalizada; y una vez más, por causa de un cataclismo cósmico. Es casi seguro que se trató de un meteorito que golpeó la Tierra en la zona de Chicxulub, en el actual golfo de México; el cuerpo celeste pudo tener un diámetro de al menos diez kilómetros, y en el choque formó un cráter de unos 200 kilómetros de diámetro.

Luego, durante la Era Cenozoica, la historia del clima parece ser más compleja; pero quizá sólo porque tenemos cada vez más datos y podemos afinar más... En general, estamos ante el periodo de temperaturas más frías de la historia del planeta. Del moderado calor que había al iniciarse la Era Terciaria, una vez sedimentados los efectos del choque meteorítico que terminó, entre otros, con los dinosaurios, se fue pasando poco a poco a unas temperaturas cada vez más bajas. La Antártida comenzó a congelarse de manera permanente hace unos 35 millones de años, cuando se inició una intensa glaciación que coincidió, además, con la aproximación de ese continente al polo Sur. Hace unos 28 millones de años, el continente helado acumulaba ya tanto hielo que comenzó a «producir» grandes bloques de hielo flotantes (icebergs). Y hace «sólo» 24 millones de años es cuando se instaló ya en el polo Sur. Como el frío siguió siendo la tónica dominante del clima de esa época, hace unos 13 millones de años comenzó también a helarse el polo Norte —en forma de hielos flotantes— y aparecieron los primeros glaciares permanentes en Alaska; en Groenlandia aparecieron los hielos permanentes algo más tarde, hace 8 millones de años. Luego, entre 5 y 3,5

EL CLIMA

millones de años atrás, hubo una pausa en los fríos —no se puede hablar de calor, pero sí de temperaturas más benignas— y después reapareció, hace algo más de 3 millones de años, una intensa glaciación, prelude de las que luego abundarían durante el Cuaternario.