

FUNDAMENTOS CONCEPTUALES Y DIDÁCTICOS

INFLUENCIAS CÓSMICAS SOBRE EL CLIMA TERRESTRE

Cosmic influence on the Earth's climate

Joan Miró (1), Jaume Soler (2)

RESUMEN

Se exponen algunos de los ciclos conocidos de larga duración que afectan al clima terrestre y se sugiere su interpretación a partir de consideraciones cósmicas, como podrían ser impactos de pequeños cuerpos celestes o el paso a través de nubes de polvo de la Galaxia. También se discute la posible influencia de la lenta variación de los parámetros orbitales de los planetas en el clima. Finalmente se comenta una teoría reciente sobre cambios bruscos de inclinación del eje de rotación de los planetas y, en el caso de la Tierra, la influencia estabilizadora de la Luna.

ABSTRACT

A relation is suggested between the long-period cycles of the Earth climate and cosmic phenomena such as the impact of small bodies or the passage through dust clouds in the Galaxy. The possible influence of the slow variation of the planetary orbital parameters on the climate is also discussed. A recent theory on abrupt variations of the inclination of rotational axes is exposed, as well as the stabilizing influence of the Moon in the case of the earth.

Palabras clave: clima, nube de polvo, órbita, meteorito.

Keywords: climate, dust cloud, orbit, meteorite.

CIELOS Y TIERRA

El viajero que procedente del Mediterráneo alcanza el Piamonte y se sitúa entre los Apeninos y la cadena occidental de los Alpes puede desarrollar múltiples lecturas, orientadas unas por los sentidos y otras por la cultura, del entorno que le rodea. Por una parte, puede elegir el paisaje modificado por el hombre: los campos cultivados, las vías de comunicación, los pueblos, el río parcialmente - sólo parcialmente - domado; todo ello ordenado geométricamente. Una labor de siglos, un proceso de adaptación al clima que rehace el medio ambiente. Por otra, puede elevar la mirada hacia las montañas cercanas a la residencia humana. Aún no siendo el macizo visible, ni mucho menos, el mayor del mundo, las masas inmensas de las montañas impresionan por su poderío. Es un trabajo de eones, que incide en el clima de la región y que es capaz de originar zonas de microclimas.

Quizás el espectador levantará sus ojos hacia un sol invernal y, a pesar de la distancia, apreciará la influencia de la estrella que nos da vida, evocará la relación que une la Tierra con el Sol, las dimensiones del sistema solar y el cúmulo de

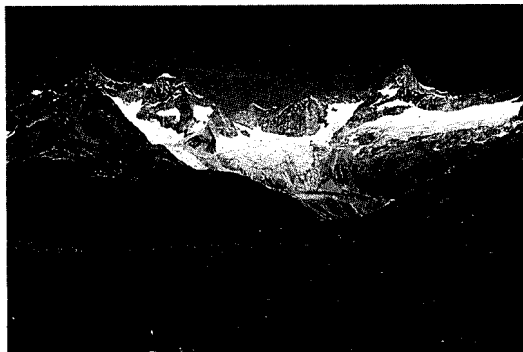


Figura 1. Los Alpes.

circunstancias que confieren a nuestro planeta unas características particulares, con unas condiciones de tolerancia muy limitadas, irrepetibles en otros miembros de la familia solar.

Pero incluso así el espectador sólo ve una parte de la realidad, la que tiene ante sus ojos, y lo que de ello se puede inferir. Descubre lo inmediato, aunque se atreva a interpretarlo y a considerar su efecto a lo largo de miles de millones de

(1) Dept. Química. Universitat de Girona. Pl. Hospital, 6. 17071 Girona. Spain

(2) Dept. d'Informàtica i Matemàtica Aplicada. Universitat de Girona. Pl. Hospital, 6. 17071 Girona. Spain

años. Sin embargo, durante esos miles de millones de años de existencia de la familia del Sol, ¿qué otras cosas han ocurrido? ¿Qué puede ocurrir todavía? ¿Qué sucederá otra vez?

Las estrellas parecen demasiado lejanas. Las consideramos indiferentes a la evolución climática de la Tierra con demasiada facilidad. A la escala de tiempo de una vida humana están prácticamente inmóviles. La Vía Láctea parece ser tan invariable a lo largo de los siglos que ha sido considerada como la indicación permanente de un camino. Si contemplamos el cielo de noche, la Galaxia, cuya edad es de diez mil millones de años, aparenta ser vacía, pues las distancias entre las estrellas son inmensas.

Mach se refería en realidad a otro tema, en 1883, al advertir las fuerzas inerciales de nuestro planeta debían ser atribuidos a la interacción con la materia más alejada del universo. Su principio no puede aplicarse aquí directamente; pero puede inspirar nuevas reflexiones.

LA SENDA DEL SOL

El Sol se encuentra relativamente lejos del núcleo de la Vía Láctea (véase la figura 2). Actualmente está cerca del brazo de Orión, o brazo local, del que forman parte, por ejemplo, la nebulosa de Orión y ciertas estrellas de Escorpión. El Sol emergió del brazo de Orión hace 6 o 9 millones de años a la velocidad de unos 25 km por segundo. El entorno de nuestra estrella es el disco de la Galaxia, donde existen nubes de gas y polvo nubes masivas y frías, cuya masa equivale a millones de veces la del Sol y cuyo diámetro puede ser de centenares de años-luz. El Sol va atravesando estas nubes en su movimiento alrededor del centro de la Galaxia. Tarda, en cruzar un brazo de la Vía Láctea, entre 50 y 100 millones de años.

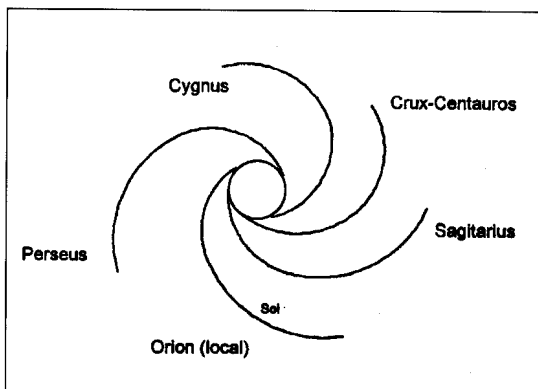


Figura 2. Esquema de la Vía Láctea, con la posición aproximada del Sol.

En las cercanías del Sol (véase la figura 3) aparecen nubes de polvo de formas irregulares, restos de supernovas (representados por círculos) y otras estrellas (sólo se representan al-

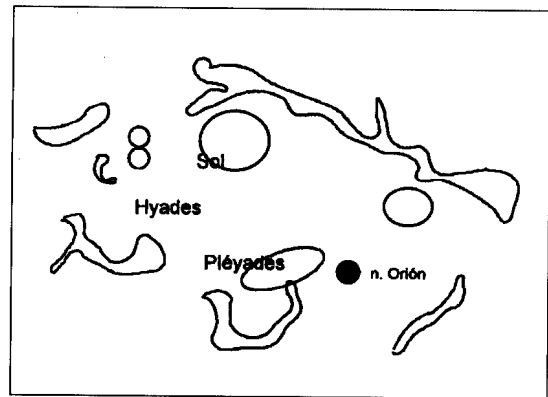


Figura 3. Entorno del Sol.

gunos grupos importantes por su identidad, aunque no sean las estrellas más cercanas), además de la nebulosa de Orión (círculo tramado). El Sol sufre la influencia gravitatoria de los brazos galácticos, una influencia que puede afectar una estructura tan susceptible como la nube cometaria en los confines de la familia solar. Hasta cierto punto, es posible establecer una conexión cósmica que relacione las transformaciones climáticas experimentadas por la Tierra, como miembro del sistema solar, con las perturbaciones que sufre el Sol en su camino por la Vía Láctea. Incluso los episodios orogénicos o de vulcanismo, la ruptura de Pangea hace 200 millones de años, las extinciones, las inversiones del campo magnético terrestre, las glaciaciones, la luz zodiacal ... pueden estar influenciados por los movimientos del Sol a través de la Galaxia. No se deben excluir, naturalmente, las explicaciones basadas en fenómenos exclusivamente terrestres o en los mecanismos solares, todavía no conocidos en su totalidad (el ciclo solar de 11 años, relacionado con las manchas solares, parece que se combina con otros de períodos más largos).

El movimiento relativo del Sol en torno a la Galaxia puede describirse mediante dos componentes (véase la figura 4). Una consiste en una oscilación centrada en el núcleo de la Vía Láctea que se traduce en un giro galáctico del Sol que tiene una duración de unos 250 millones de años

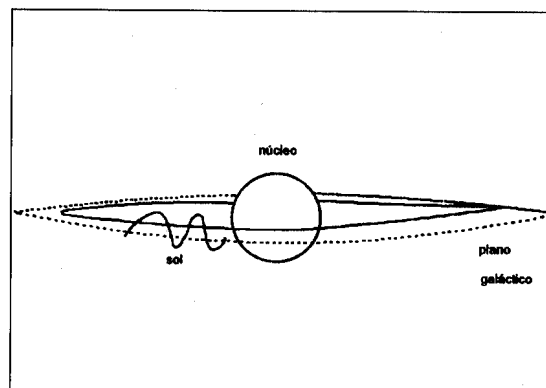


Figura 4. Movimientos del Sol en la Vía Láctea.

terrestres. La otra componente es una oscilación por encima y por debajo del plano galáctico, que es atravesado por el sol cada 30 millones de años terrestres. Al atravesar el plano galáctico, el sol experimenta una especie de bamboleo del que se derivan ciclos alternados, uno de los cuales es de 15 millones de años.

GRANDES CICLOS CLIMÁTICOS

Los movimientos de las lindes de los bosques árticos, los núcleos de hielo de Groenlandia y de la Antártida, los anillos de árboles congelados, los estudios paleobotánicos, el análisis de las capas de cenizas volcánicas del pasado, todo un conjunto de trabajos de índole muy diversa permiten trazar hasta cierto punto la historia del clima de la Tierra. Una historia que es más precisa cuanto más cercana a nuestra época es. Los investigadores han detectado la existencia en la Tierra de ciertos ciclos que se resumen en la tabla I (elaborada a partir de la que presentan Clube y Napier).

El fenómeno al que se refiere uno de estos ciclos, la inversión del campo geomagnético es relativamente rápido; una vez iniciado el proceso, dura unos miles de años. Existen períodos de gran estabilidad seguidos de episodios de inversión que se suceden de 5 a 10 veces en un millón de años. De ello se infiere que existe en realidad una superposición de ciclos distintos. Aunque se relaciona el campo magnético con el movimiento del núcleo fluido del planeta, el mecanismo todavía no ha sido comprendido en su totalidad. Pero los sondeos indican que existe un correlación, por lo menos durante los últimos 500 mil años, entre las variaciones del campo magnético terrestre y las temperaturas. Cuanto más débil es el campo geomagnético, más baja es la temperatura media terrestre.

La figura 5 representa esquemáticamente los climas (comparando temperaturas medias) que se supone ha experimentado la Tierra durante los últimos mil millones de años. La figura 6 reproduce, también de forma esquemática, los climas supuestos entre 180 mil años antes de la era común y la época actual. En ambos casos, la representación sigue una escala aproximada.

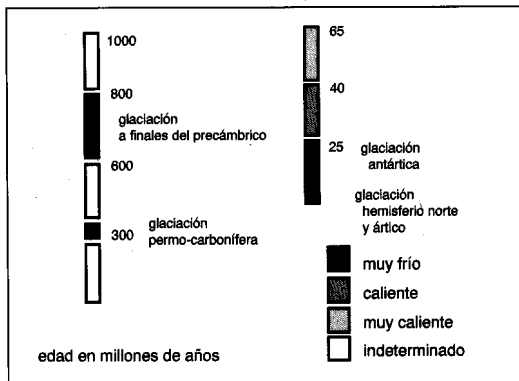


Figura 5.

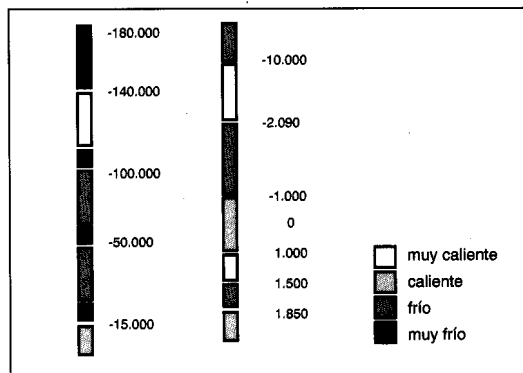


Figura 6.

TABLA I: CICLOS TERRESTRES

<i>Ciclos</i>	<i>Duración en millones de años terrestres</i>
orogénicos	30 a 250
temperaturas	30
extinciones	80 a 90
extinciones catastróficas	225 a 275
producción de carbonatitas	230 a 250
cráteres de impacto	26
inversiones geomagnéticas	30 a 34
inversiones geomagnéticas (1)	15 a 285
cráteres	27 a 32
glaciaciones	200 a 250
sucesos tectónicos	230
climáticos	300

(1) otros ciclos, que contienen períodos de polaridad fija de 50 a 100 millones de años.

No debemos olvidar los mecanismos solares, ya citados, ni la influencia de la disposición de las masas continentales sobre el clima y las corrientes marinas. Ahora bien, si el Sol y sus planetas atravesasen, en sus movimientos por la Vía Láctea, una nube de polvo lo suficientemente densa, la cantidad de radiación solar resultaría afectada y el delicado equilibrio climático de la Tierra sufriría las consecuencias.

Si fuera la nube cometaria, o nube de Oort, la que sufriera perturbaciones, los cuerpos cometarios caerían hacia el Sol. Su llegada se produciría millones de años después de la perturbación. La desintegración de un cometa gigante puede originar una gran diversidad de escombros, desde algunos cuerpos de 10 km de diámetro a centenares de 1 km, enjambres más pequeños y una gran cantidad de polvo. Polvo suficiente para absorber la luz del sol. En la actualidad, la órbita terrestre corta las órbitas de enjambres como el de las Táuridas, el de las Oriónidas o el de las Piscidas. El primero, el de las Táuridas, se considera que son los restos de una disgregación del cometa Encke.

La hipótesis de un impacto directo parece hoy muy improbable, dada la tranquilidad aparente de nuestro entorno cósmico inmediato. Sin embargo, existen indicios de impactos en la Tierra, cráteres meteoríticos o restos de materiales, en el pasado. Es posible que los cielos de la Tierra fueran entonces más frecuentados - incluso en épocas históricas - y ciertas evidencias revelan que hace ocho siglos la Luna sufrió un fuerte impacto, sin olvidar lo sucedido en Tugunaska a principios de este siglo. Se ha hablado mucho sobre los efectos de una colisión directa, por lo que no nos extenderemos mucho en este tema. Una colisión directa, tanto en el mar como sobre la superficie de los continentes, puede implicar una energía de centenares de millones de megatones. Originaría cambios climáticos, terremotos, actividad volcánica. Un impacto oblicuo puede afectar el campo magnético terrestre, pues el fluido interior reaccionará más lentamente. Señalemos, por otra parte, que también la formación de un casquete polar, el movimiento de los hielos durante las glaciaciones puede afectar al geomagnetismo.

Hasta aquí hemos visto la posible influencia del movimiento del sistema solar dentro de la Galaxia en la evolución de nuestro planeta, la posibilidad de que cometas procedentes de la nube de Oort, que rodea la Tierra a una distancia de aproximadamente 50000 veces el radio de la órbita terrestre, choquen con ella, y al final, en un viaje de acercamiento a nuestro planeta, hemos comentado la influencia del Sol, a causa de la variación de intensidad de la radiación que nos envía. Siguiendo este camino de lo más lejano a lo más cercano, existen aún otras influencias que pueden ser determinantes para la evolución de la Tierra. En efecto, el sistema solar está formado por muchos cuerpos, algunos muy grandes, como los planetas y sus lunas, otros microscópicos. No hay que olvidar que todos ellos están interconectados por la ley de la gravitación

universal, y que en la interacción gravitatoria entre un gigante como Júpiter y una partícula con una masa de un gramo perdida en alguna parte del sistema solar, la misma fuerza que ejerce Júpiter sobre la partícula ejerce la partícula sobre Júpiter, la diferencia está en que la misma fuerza, en el caso de Júpiter, tiene que repartirse entre muchos kilogramos de masa y la aceleración producida, según la segunda ley de Newton, es mucho menor.

MOVIMIENTO ORBITAL EN EL SISTEMA SOLAR

Una descripción somera del movimiento de los planetas afirma que se mueven en órbitas elípticas, con el Sol en uno de los focos de la elipse, de tal forma que el radio vector que une el planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales, y de manera que los cuadrados de los períodos son proporcionales a los cubos de los semiejes mayores. Éstas son las tres leyes descubiertas por Kepler, que arrojaron al desván la descripción a base de movimientos circulares de la astronomía antigua y significaron el nacimiento de la Astronomía Nueva. De hecho, las leyes de Kepler sólo serían rigurosamente ciertas, en el marco conceptual de la mecánica de Newton, para un sistema solar formado por un Sol y un sólo planeta, ambos perfectamente esféricos y homogéneos, absolutamente solos en un Universo vacío. Pero el sistema solar está formado por muchos cuerpos, y está rodeado por miles de millones de otros cuerpos en su propia Galaxia: el resultado es que el movimiento descrito por las leyes de Kepler es tan sólo una primera aproximación. Merece la pena detenerse en un estudio un poco más profundo del movimiento planetario, puesto que todo parece indicar que pequeñas diferencias tienen, a la larga, una influencia decisiva en la evolución del planeta.

Veamos en primer el movimiento descrito por Kepler. Es bien conocido que una elipse es la curva, de forma ovalada, que se obtiene cuando se corta un cilindro por un plano que no sea perpendicular a una generatriz. También es la curva que se obtiene al fijar los extremos de un cordel sobre un tablero de dibujo y mantenerlo tirante con ayuda de la punta de un lápiz al tiempo que se desliza el lápiz dibujando sobre el papel. Para cada punto así obtenido la suma de distancias a los focos (puntos de sujeción del cordel) es la misma (la longitud del cordel); esta es otra definición geométrica de elipse. El eje mayor es el segmento que determina la elipse sobre la recta que pasa por los focos; el punto medio entre los dos focos es el centro y divide el eje mayor en dos semiejes. El grado de achatamiento de una elipse viene dado por la excentricidad, que es el número que se obtiene al dividir la distancia entre los focos por la longitud del eje mayor. Las órbitas casi circulares tienen excentricidad próxima a 0, mientras que las muy aplastadas tienen excentricidad próxima a 1.

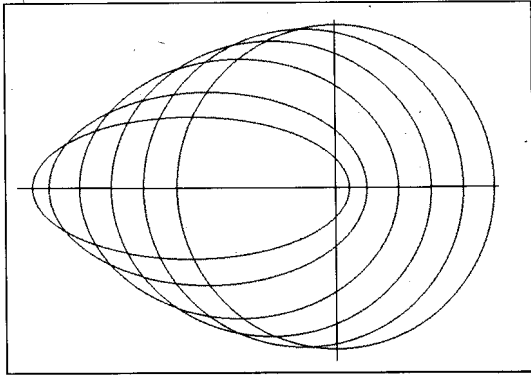


Fig. 7. Elipses con el mismo semieje y distinta excentricidad

En el caso de las órbitas planetarias hay que tener en cuenta que el Sol no está en el centro, sino en un foco. El extremo del eje mayor más cercano al Sol se denomina perihelio y el más alejado afelio. Estos dos puntos se denominan los ápsides de la órbita y la recta que los contiene se llama tradicionalmente la línea de los ápsides. Las órbitas de los planetas en el sistema solar tienen excentricidades menores que 0,1 con la única excepción de Mercurio con 0,2 y Plutón con 0,25. Los cometas periódicos tienen típicamente excentricidades muy grandes y los asteroides muestran toda la gama posible, desde excentricidades típicamente planetarias hasta excentricidades cometarias. La figura 7 muestra órbitas con el mismo semieje y excentricidades de 0,0 (correspondiente a la circunferencia), 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 y 0,9. Todas las órbitas tienen un foco en común.

El tamaño y forma de la órbita están determinadas por dos constantes del movimiento: la energía mecánica (energía cinética más energía potencial) y el momento angular. La energía mecánica determina completamente el valor del semieje mayor de la órbita, mientras que la energía y el momento angular determinan conjuntamente el valor de la excentricidad.

Sin embargo, para describir el movimiento planetario no es suficiente dar el tamaño (valor del semieje mayor) y forma (excentricidad) de la órbita, sino que además hay que tener en cuenta su colocación en el espacio.

Imaginemos un sistema de ejes cartesianos con origen en el Sol de tal manera que el plano xy contenga la órbita de la Tierra. En la antigua Grecia llamaban *eclíptica* a la trayectoria aparente que sigue el Sol a lo largo del año sobre la esfera celeste y este nombre se ha conservado hasta nuestros días pasando a significar simplemente la órbita terrestre. El plano de la eclíptica es, naturalmente, el plano que contiene a la órbita de la Tierra. Tomaremos el convenio de hacer pasar el eje de las x por un punto determinado de la órbita de la Tierra, el denominado *punto Aries*, o también punto vernal, que coincide con la posición de la Tierra el día del equinoccio de primavera.

Siguiendo el movimiento de la Tierra en su órbita, cuando ésta ya ha avanzado un ángulo de 90 grados con vértice en el Sol, encontraremos el eje de las y . El eje de las z es perpendicular al plano de la eclíptica y su dirección positiva es la de avance de un sacacorchos que gire en el mismo sentido que la Tierra. Por convenio llamaremos parte superior de la eclíptica al semiespacio que contiene la parte positiva del eje de las z , y parte inferior al otro semiespacio.

La órbita de cualquier otro cuerpo del sistema solar está contenida en un plano que pasa por el Sol y que corta al plano de la eclíptica en una recta llamada *línea de los nodos*. Los dos nodos son los puntos en que la órbita en cuestión atraviesa el plano de la eclíptica y distinguimos el nodo *ascendente*, que corresponde al paso de la parte inferior de la eclíptica a la superior, y el nodo *descendente*, correspondiente al paso contrario. El ángulo Ω que forma la línea de los nodos (en la dirección del nodo ascendente) con el eje de las x , medido en sentido directo, se llama la *longitud del nodo ascendente* o, simplemente, la *longitud del nodo*. Fijado este ángulo, podemos variar la inclinación del plano orbital, manteniendo invariable la línea de los nodos; el ángulo i que forman los dos planos se llama la *inclinación* de la órbita.

Hasta aquí hemos fijado la posición del plano orbital en el espacio, pero todavía podemos elegir la posición de la órbita dentro de su plano puesto que podemos girarla sin salir de él. El ángulo ω que determina la posición de la órbita dentro de su plano es el que forma el semieje mayor, en dirección al perihelio, con la línea de los nodos. Este ángulo, medido sobre el plano orbital a partir del nodo ascendente se llama *longitud del perihelio*.

Los cinco parámetros que determinan una órbita se llaman tradicionalmente los *elementos* de la órbita. Se suele añadir un sexto elemento, que puede ser el tiempo o un ángulo de posición a partir del perihelio para determinar la posición del planeta en su órbita. La figura 8 da una idea de la significación geométrica de los tres elementos angulares: inclinación, longitud del nodo y longitud del perihelio.

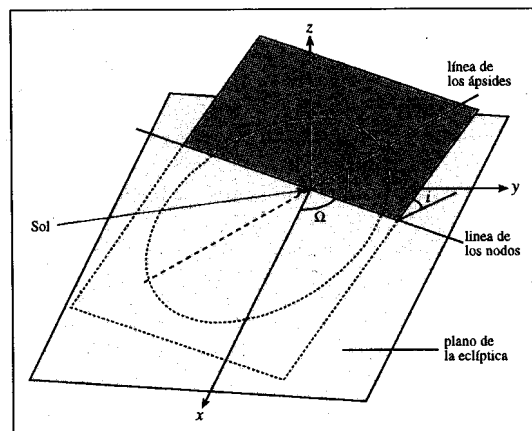


Fig 8. Los elementos angulares

LA TEORÍA DE PERTURBACIONES Y EL CLIMA

En el modelo de Kepler, los elementos orbitales de cada planeta permanecen constantes en el tiempo. En un modelo más refinado hay que tener en cuenta las perturbaciones gravitatorias que cada planeta ejerce sobre los demás, de tal modo que los elementos no son constantes, sino que varían lentamente con el tiempo. Determinar estas variaciones es el objetivo de la teoría de perturbaciones, paradigma de la Astronomía dinámica de los siglos XVIII y XIX.

Las perturbaciones de los elementos pueden ser de dos tipos: seculares y periódicas. Una perturbación es secular cuando su efecto sobre el parámetro en cuestión es un incremento o decremento de su valor con velocidad constante, mientras que las perturbaciones periódicas consisten en oscilaciones alrededor de un valor de referencia. Las perturbaciones periódicas pueden tener períodos muy distintos y un mismo elemento orbital puede sufrir simultáneamente perturbaciones seculares y periódicas de varios períodos.

El cálculo de perturbaciones es muy complicado y, de hecho, un análisis profundo muestra que la distinción entre los dos tipos de perturbaciones es artificial: cuando estamos aproximando una función desconocida (el movimiento orbital), no hay forma de distinguir si un término secular es realmente secular o es simplemente una primera aproximación de un término periódico de período muy largo. Para tener una idea de la complicación de la teoría de perturbaciones, imaginemos un sistema solar reducido con un sol y únicamente dos planetas, que vamos a llamar Júpiter y Saturno. La aproximación de orden cero es suponer los dos movimientos elípticos sin influencia mutua: este movimiento es bien conocido. Entonces utilizamos el movimiento conocido de Júpiter para calcular las perturbaciones que ejerce sobre Saturno, y recíprocamente, con lo cual obtenemos la perturbación de primer orden. Naturalmente, la perturbación de primer orden sobre cada planeta está calculada sobre una hipótesis falsa: el movimiento no perturbado del otro planeta. Por tanto, en el cálculo de las perturbaciones que Júpiter ejerce sobre Saturno debemos tener en cuenta también el hecho de que la órbita de Júpiter está perturbada, en primera aproximación ... por el propio Saturno! Obtenemos así las perturbaciones de segundo orden, en las que cada planeta influye sobre sí mismo a través de la perturbación de primer orden de la órbita del otro. Está claro que el proceso debe proseguir indefinidamente y en el límite, si existe, obtendremos el movimiento real.

Desgraciadamente, el programa de cálculo anterior es con mucho demasiado complejo para que pueda ser llevado a cabo por medio de expresiones algebraicas mucho más allá del tercer o cuarto orden. Si bien en el pasado este método ha proporcionado éxitos resonantes, como por ejemplo el descubrimiento de Neptuno por puro cál-

culo a partir de las perturbaciones inexplicadas sobre Urano (Adams y Leverrier, a mediados del siglo XIX), y la era de los ordenadores permite la manipulación automática de expresiones algebraicas, lo cierto es que el cálculo de perturbaciones no ha podido dar respuesta a grandes interrogantes de la Astronomía dinámica como, por ejemplo, la estabilidad para tiempo indefinido del sistema solar.

Por consiguiente, un modelo de sistema solar elaborado consiste en ver cada planeta moviéndose rápidamente, en una escala de tiempo astronómica, sobre su órbita, mientras que los elementos de esta órbita van cambiando lentamente. Los cambios consisten, en primera aproximación, en una variación con velocidad constante de la longitud del nodo y de la longitud del perihelio y en cambios periódicos de la inclinación, de la excentricidad y del semieje. Es decir, el planeta gira rápidamente sobre su órbita mientras que la órbita gira lentamente dentro del plano orbital, el cual a su vez gira lentamente en el espacio al mismo tiempo que oscila en relación con el plano de la eclíptica; además la órbita está constantemente cambiando su forma y tamaño, aunque las perturbaciones del semieje son mucho menores.

¿Qué relación tienen estos cambios astronómicos, que típicamente necesitan miles de años para ser percibidos, con el clima de la Tierra? Un cálculo relativamente sencillo muestra que la cantidad total de calor que recibe la Tierra del Sol depende de la excentricidad de la órbita: es máximo para una órbita circular y decrece al aumentar la excentricidad. La razón es que, si bien en una órbita excéntrica la Tierra llega a pasar más cerca del Sol, lo hace en durante un intervalo de tiempo corto, mientras que pasa mucho más tiempo en el extremo de la órbita más alejado del Sol. El balance neto es tanto más desfavorable para la cantidad total de calor recibido cuanto más excéntrica es la órbita.

Otra cuestión a tener en cuenta es la inclinación del eje de rotación de la Tierra, que determina la existencia de las estaciones y que está sujeta a perturbaciones debidas a la influencia del Sol la Luna y los planetas sobre el abultamiento ecuatorial de la Tierra. Esto no influye directamente en la cantidad total de calor recibido del Sol pero sí puede influir indirectamente. Una consideración elemental sería la siguiente: si el eje de rotación es perpendicular a la eclíptica, no hay estaciones y el calor del Sol se reparte cada de la misma manera cada día del año; si, por el contrario, la inclinación del eje es muy grande, las regiones polares de un hemisferio pasan mucho tiempo sin ver el Sol, lo cual produce grandes nevadas y recubre todo un casquete de una capa de hielo más o menos gruesa. Seis meses más tarde, este casquete está orientado hacia el Sol, pero la alta reflectividad del hielo hace que la mayor parte de la radiación recibida sea devuelta al espacio: el resultado es una pérdida de calor que puede llegar a ser considerable.

Alrededor de 1930, Milankovich desarrolló una teoría de la influencia de los pequeños cambios orbitales en el clima, y obtuvo una correlación razonable de lo que se supone que fue el clima en los últimos 150000 años con la evolución de los parámetros orbitales en el mismo intervalo de tiempo. La dificultad es doble: por una parte la Paleoclimatología debe proporcionar datos sobre los climas pasados y por otra parte la Astronomía dinámica debe poder calcular los parámetros orbitales hacia atrás en el tiempo con precisión. Aún hoy en día, con potentes ordenadores, no es en absoluto trivial calcular la excentricidad de la órbita terrestre de hace 150000 años con seis decimales y garantizar que el resultado está libre de error.

La lenta deriva de los parámetros orbitales explica también que fenómenos como las lluvias de meteoritos sean irregulares. En efecto, estos fenómenos están asociadas a cometas que se han disgregado y por su origen común podemos, en principio, hablar de la órbita del enjambre de meteoritos. Sólo puede producirse una lluvia de meteoritos si la órbita del enjambre corta a la órbita terrestre y si la Tierra y el enjambre coinciden en pasar por este punto —el nodo de la órbita del grupo de meteoritos— al mismo tiempo. Una pequeña variación en los parámetros orbitales del enjambre puede hacer que la Tierra evite el grueso del grupo de meteoritos. Hay que tener en cuenta además que, de hecho, cada meteorito está en una órbita particular y que las perturbaciones no son la misma para cada órbita, de modo que el enjambre se va expandiendo en el espacio al mismo tiempo que disminuye su densidad.

El siglo XX ha añadido algunos detalles a esta visión de las perturbaciones de las órbitas de los planetas del sistema solar, admitiendo la posibilidad de cambios relativamente bruscos de los parámetros orbitales debidos a resonancias más o menos complejas entre los períodos de los planetas y los períodos de rotación, mucho más largos, de los nodos y los perihelios de sus órbitas. De esta manera, J. Laskar, miembro del Bureau des Longitudes de París, ha calculado variaciones bruscas de excentricidad de algunos asteroides, debidas a las perturbaciones de Júpiter, a causa de las cuales dichos asteroides podrían llegar a pasar a poca distancia de Marte y salir despedidos del sistema solar por el empujón gravitacional que sufrirían. Este mecanismo es la explicación que actualmente se considera más probable de la existencia de algunas zonas vacías en el cinturón de asteroides.

Como último paso en este viaje de aproximación a la Tierra, consideremos nuestro satélite, la Luna, y su posible influencia en la evolución de

la Tierra. Es sabido que el eje de rotación de la Tierra, inclinado 23 grados sobre la eclíptica, se mantiene casi paralelo a sí mismo a lo largo de una rotación de la Tierra alrededor del Sol. El “casi” es debido a una lenta rotación, de período aproximadamente 25000 años, causada por la acción gravitatoria del Sol, la Luna y, en menor medida los demás planetas, sobre el abultamiento ecuatorial. Este movimiento se conoce como *precesión de los equinoccios* y es el responsable de que dentro de unos pocos miles de años el eje de rotación de la Tierra no apunte hacia la estrella polar. La inclinación del eje, por su parte, no sufre grandes variaciones en períodos muy largos de tiempo. Pues bien, J. Laskar ha calculado que si no existiera la Luna el período de la precesión de los equinoccios sería muy distinto y estaría en resonancia con varias magnitudes importantes del sistema solar, en particular la rotación de los nodos de la órbita de Júpiter. Esto provocaría perturbaciones de hasta 20 grados en la inclinación del eje en períodos cortos del orden de pocos miles de años y las variaciones climáticas producidas por el mecanismo expuesto anteriormente quizá habrían impedido la aparición de la vida en la Tierra. Debemos estar agradecidos, pues, a nuestro modesto satélite, que además de inspirar a enamorados y poetas, lleva a cabo una labor diaria, más prosaica pero no menos importante, de ayudar a mantener en su sitio el eje de rotación de nuestro planeta.

BIBLIOGRAFÍA

- Booth, B. y Fitch, F. (1986). *La inestable Tierra*, Salvat eds. Barcelona
- Clube, V. y Napier, B. (1995). *El invierno cósmico*. Alianza ed. Madrid
- Gribbin, J. (1986). *El clima futuro*. Salvat eds. Barcelona.
- Hoyle, F. (1983). *The intelligent Universe*. M. Joseph. Londres.
- Hsü, K.J. (1993). *La gran extinción*. A. Bosch. Barcelona
- Joutel, F., Laskar, J. y Robutel, P. (1993). *Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon*. Nature 361, pp. 615-617
- Labeyrie, J. (1988). *El hombre y el clima*. Ed. Gedisa. Barcelona
- Laskar, J. (1994). *La luna y el origen del hombre*. Investigación y Ciencia, julio de 1994
- Laskar, J. y Froeschlé, C. (1991). *El caos en el sistema solar*. Mundo Científico, julio de 1991
- Laskar, J. y Robutel, P. (1993). *The chaotic obliquity of the planets*. Nature 361. pp. 608-612
- Sagan, C. (1983). *La conexión cósmica*. Plaza y Janés. Barcelona. ■