

METEOROLOGÍA Y CLIMA

Ana María Mancho

3.1

Objetivos, contenido y criterios de evaluación de acuerdo con los Reales Decretos de Enseñanzas Mínimas, (1467/2007 de 2 noviembre para Bachillerato y 1631/2007 de 29 de diciembre para Educación Secundaria Obligatoria).

Este capítulo está dedicado al uso de herramientas y modelos matemáticos para estudiar y prever el clima. La autora hace una revisión histórica, recogiendo hábitos populares y datos para mostrar la contribución de la matemática al progreso del conocimiento sobre la meteorología. Las matemáticas facilitan un lenguaje para describir la evolución de la atmósfera, y proporcionan métodos numéricos para su previsión. Newton escribió en lenguaje matemático las leyes del movimiento de los objetos, y Euler describió las ecuaciones del movimiento de los fluidos como el agua o el aire. Se trata de información disponible para el estudiante de secundaria, quien puede conformar sus conocimientos sobre esta importante temática.

La atmósfera se comporta como un fluido y por ello las ecuaciones que la caracterizan son las ecuaciones de la hidrodinámica. Mediante estas ecuaciones se puede describir la evolución de los vientos y de la presión. Aquí se encuentra la base de la meteorología, aunque en ella también intervienen otras magnitudes físicas que describen el estado de la atmósfera como son la humedad, la condensación y evaporación del agua, el calor y la temperatura.

A lo largo de los siglos XIX y XX distintos matemáticos y meteorólogos descubrieron las leyes con las que describir la atmósfera y su evolución. El comportamiento del tiempo atmosférico es altamente impredecible, ya que las ecuaciones que describen su evolución son muy sensibles a las condiciones iniciales. Por esta razón las predicciones del tiempo solo tienen sentido en periodos no demasiados largos, desde horas a días.

La predicción del tiempo mediante métodos numéricos ha marcado la transición entre la tradición y la modernidad en meteorología, métodos que han venido apoyados por el desarrollo de las técnicas de computación y poten-

tes ordenadores, además del incremento en la precisión y ubicuidad de los instrumentos de medida de algunas variables atmosféricas, como la presión, la velocidad del viento y la humedad. La autora describe también distintas experiencias que han fundamentado la moderna meteorología.

En la actualidad el pronóstico del tiempo emplea modelos matemáticos que incorporan la rotación de la Tierra y la interacción con su geografía y el océano. Incluyen las observaciones que se logran con métodos cada vez más sofisticados y precisos, como los radares y los satélites. Para incorporar los datos en los modelos se usan numerosas herramientas matemáticas: la estadística, la teoría de los procesos estocásticos, la teoría del procesado y filtrado de señales, el control óptimo sobre problemas gobernados por ecuaciones en derivadas parciales, la optimización y la teoría de problemas inversos. Asimismo se describe la tendencia actual en la predicción del tiempo: el pronóstico por conjuntos. Esta técnica utiliza muchos pronósticos para efectuar una media y obtener una estimación del nivel de incertidumbre de los resultados. El conjunto de diagnósticos se consigue ejecutando un único modelo con leves modificaciones de las condiciones iniciales, o bien utilizando distintos modelos que existen con idénticas condiciones de partida.

Describir la evolución del clima en la Tierra es más complicado que la mera predicción meteorológica, pues en el clima influyen multitud de factores y fenómenos que no intervienen en la perspectiva meteorológica, que es mucho más local en el espacio y el tiempo. En este capítulo se describen muchos eventos y aspectos que en el pasado han contribuido a las variaciones a gran escala del clima en la Tierra, pero que no se contemplan en la predicción del tiempo y que son difíciles de prever.

EL TIEMPO Y SU PRONÓSTICO EN LA HISTORIA

La predicción del tiempo ha jugado un papel importante en la vida humana tanto en el pasado como en el presente. En el gran escenario de la historia el destino de las naciones a menudo ha dependido de las vicisitudes del tiempo. Así, en 1588 la Armada Invencible española, con la que el rey Felipe II atacó a Inglaterra, sufrió una violenta tormenta de cinco días frente a las costas de Escocia que hizo naufragar sus barcos. Los navíos que huyeron hacia el oeste intentando escapar sufrieron otra fuerte tormenta cerca de Irlanda. Solo la mitad de la flota española regresó. Algo parecido le ocurrió, en dos intentos fallidos en 1274 y 1281, al Gran Kan del imperio Mongol Kublai Khan, cuando se lanzó a la conquista de Japón con un gran ejército. Los fuertes vientos del mar destrozaron sus barcos y los estrellaron en la orilla.

Durante siglos el hombre ha intentado predecir el tiempo, observando los signos de la naturaleza en el cielo y en la Tierra, buscando indicios que hicieran esas predicciones posibles. El discípulo de Aristóteles, Teofrasto, recoge en su ensayo sobre *El libro de los signos*:

"Los signos que indican lluvia son así: inconfundiblemente es lo que ocurre al amanecer, cuando el cielo tiene una apariencia rojiza antes de salir el sol; ya que esto indica que lloverá antes de tres días, si no el mismo día".

En el capítulo XVI del Evangelio de San Mateo se lee:

"Al atardecer decís: 'Va a hacer buen tiempo porque el cielo tiene un rojo de fuego' y a la mañana: 'Hoy habrá tormenta porque el cielo tiene un rojo sombrío'".

En la cultura popular los signos sobre el tiempo y su interpretación han dejado su impronta en el refranero:

"Arco en el cielo, lluvia en el suelo", "Cielo a corderos, agua a calderos", "Aurora rubia, o viento o lluvia", "Golondrina en bajo vuelo, anuncia lluvia en el cielo".

Estos ejemplos muestran la importancia de las predicciones meteorológicas para el ser humano, aunque los éxitos en los pronósticos a veces se han conseguido por

casualidad, y otras por el método. En las mejoras de la predicción basadas en el método las matemáticas han sido muy importantes porque han facilitado un lenguaje para describir la evolución de la atmósfera, y han proporcionado las técnicas numéricas que implementan hoy en día grandes superordenadores.

LA ATMÓSFERA Y SUS LEYES

Para poder descifrar los cambios en la atmósfera, lo primero es entender su funcionamiento. **Isaac Newton** (1642-1727) asentó las bases para el desarrollo de la física escribiendo en lenguaje matemático las leyes que gobernaban el movimiento de los objetos. Más tarde el gran matemático **Leonhard Euler** (1707-1783) extendió estos resultados escribiendo las ecuaciones del movimiento de los fluidos como el agua o el aire.

Las leyes que describen la dinámica atmosférica también se expresan mediante ecuaciones en derivadas parciales. La atmósfera se comporta como un fluido, así que, de entre las ecuaciones que la caracterizan, las más destacables son las ecuaciones de la hidrodinámica. Estas ecuaciones, que describen la evolución de los vientos y la presión de la atmósfera, encierran una tremenda variedad de soluciones, que se obtienen para distintas condiciones de contorno o al variar los parámetros que intervienen en ellas. Las soluciones son fascinantes y en el mundo real se observan en una cascada o en un arroyo y en los remolinos que allí se forman.

Pero en la dinámica de la atmósfera, además de los vientos y la presión, intervienen otras variables como la humedad, relacionada con la condensación y la evaporación del agua, el calor y la temperatura, etcétera. Las ecuaciones para estas variables se acoplan con las de la hidrodinámica para describir al completo el estado de la atmósfera. La temperatura es una variable importante, pues atendiendo a su comportamiento en la atmósfera, se diferencian en ella varias capas: la troposfera, la estratosfera, la mesosfera, la ionosfera y la exosfera.

LEYES, DETERMINISMO E IMPREDECIBILIDAD

El siguiente paso es, conociendo las ecuaciones de la dinámica atmosférica, ¿se puede predecir el tiempo que hará en el futuro? Más en general, podríamos preguntarnos si, una vez descrito el funcionamiento de un sistema en el momento actual, se puede determinar cómo será en el futuro. Esto ha sido objeto de debate entre los científicos desde el siglo XVIII.

El matemático francés **Pierre Simon de Laplace** (1749-1827) pensaba que las leyes de la naturaleza y, por tanto, también las leyes que rigen la evolución del tiempo, eran deterministas y, en consecuencia, completamente predecibles. En 1776, en su ensayo filosófico *Sobre las probabilidades*, escribe:

“El estado actual de un sistema es consecuencia de lo que ha sido en el instante precedente, y si imagináramos una inteligencia capaz de concebir en un momento dado todas las relaciones entre los entes del universo, podrían establecer las posiciones, movimientos y efectos generales de estos entes en cualquier momento del pasado o del futuro”.

El matemático **Jules Henri Poincaré** (1845-1912) (figura 1) opinaba de manera distinta, pues argumentaba que pe-



Figura 1. Jules Henri Poincaré. Foto en el frontispicio de la edición 1913 de *Dernières pensées* (*Sobre la ciencia y su método: el espacio, últimos pensamientos*). Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:JH_Poincare.jpg

queñas incertidumbres en la definición del estado de un sistema podrían amplificarse en el tiempo e impedir las predicciones en el futuro. En 1908, en su obra *Ciencia y método* escribiría:

“Si sabemos exactamente las leyes de la naturaleza y la situación del universo en el momento inicial, podríamos predecir exactamente el estado del universo en el instante siguiente. Pero incluso si fuera el caso de que las leyes naturales ya no encerraran secretos para nosotros, podríamos conocer el estado inicial del universo solo aproximadamente. Podría suceder que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produjeran diferencias muy grandes en los fenómenos finales. Un pequeño error en la determinación de las primeras produciría un error enorme en las últimas. La predicción es imposible y tenemos el fenómeno fortuito”.

En lo relativo a la predicción del tiempo, las ecuaciones de la dinámica atmosférica son difíciles de resolver dada la diversidad y complejidad de las soluciones que contienen. Entre 1961 y 1963 **Richard Feynman** (1918-1988), en sus *Lecciones de física*, refiriéndose a las ecuaciones de la hidrodinámica, declaraba:

“La próxima gran era del despertar del intelecto humano bien puede producir un método para entender el contenido cualitativo de estas ecuaciones. Hoy no podemos. Hoy no podemos ver que las ecuaciones que describen el fluir del agua contienen cosas tales como [...] la estructura turbulenta que uno observa [...]”.

Con objeto de entender las soluciones de las ecuaciones que rigen la atmósfera, en esa misma época, **Edward Lorenz** (1917-2008), un profesor de meteorología del Massachusetts Institute of Technology dedujo un sencillo modelo de convección atmosférica, que ejecutaba en su ordenador. Comparó dos simulaciones de su modelo: la primera simulación se ejecutó en un único periodo de pronóstico, mientras que la segunda, aunque era para idéntico periodo de pronóstico, se ejecutó en dos partes. La primera parte correspondía a un intervalo de tiempo breve, y sus resultados sirvieron como condición inicial para la simulación en el periodo de tiempo restante. Los resultados de ambas simulaciones, aunque se esperaba que fueran idénticas, resultaron ser muy distintas. Dado que las ecuaciones usadas eran idénticas, Lorenz al principio pensó que el fallo era del

ordenador, pero finalmente descubrió que la razón se debía a la imprecisión de las condiciones iniciales empleadas en la segunda parte de la segunda simulación.

Los resultados de la primera parte se habían almacenado en la memoria del ordenador como dígitos con seis cifras decimales. Para ahorrar tiempo, en la simulación del segundo tramo Lorenz usó como condiciones iniciales datos que preservaban solo las tres primeras cifras decimales, es decir, en vez de escribir números como 1,347321 escribió 1,347. Lorenz observó que al principio de la simulación del segundo tramo, los resultados en cada paso temporal estaban inicialmente muy cercanos, pero que conforme el tiempo evolucionaba ambas soluciones se separaban. En consecuencia, concluyó que las predicciones del tiempo solo tenían sentido para intervalos de tiempo relativamente breves, entre horas y días.

El comportamiento del tiempo para periodos largos como meses o años es altamente impredecible, ya que las ecuaciones que describen su evolución son muy sensibles a las condiciones iniciales, y solo si las condiciones de la atmósfera se conocieran con precisión infinita la predicción tendría sentido. Este fenómeno se ha popularizado con el nombre de “**efecto mariposa**”, pues uno podría pensar que incluso la perturbación producida por el leve aleteo de una mariposa podría cambiar las condiciones del tiempo en un punto dado. Así, de esta



Figura 2. Edward Lorenz.
Fuente: http://photos.aip.org/history/Thumbnails/lorenz_edward_a1.jpg.
Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Edward_lorenz.jpg.

EJERCICIO:

Experimento numérico: haz una predicción de un sistema caótico.

Material: Calculadora u ordenador.

Procedimiento: Imagina que U es una variable atmosférica cuya evolución en el tiempo $n+1$ viene dada por su estado en el tiempo n (U_n) según la siguiente expresión:

$$U_{n+1} = 3.6 U_n (1 - U_n)$$

Considera un valor para $U = 0.722$ en el tiempo $n = 1$, que debes introducir en la parte derecha de la igualdad. Tras evaluar la expresión obtienes la solución de U en $n = 2$. Si el resultado para $n = 2$ lo reintroduces en la parte derecha de la igualdad, obtienes la magnitud U en el tiempo $n=3$. Iterando o repitiendo esta forma de proceder conseguirás los sucesivos valores de U en los distintos tiempos.

1. Toma para $n = 1$ el valor de $U_1 = 0.722$. Itera la ecuación hasta obtener U_{20} . Anota el resultado final.
2. Ahora toma para $n = 1$ el valor de $U_1 = 0.723$. Itera la ecuación hasta obtener U_{20} . Anota el resultado final.
3. Finalmente toma para $n = 1$ el valor de $U_1 = 0.721$. Itera la ecuación hasta obtener U_{20} . Anota el resultado final.

Dibuja los resultados representando la iteración n en el eje horizontal y el valor de U en el vertical. ¿Notas la sensibilidad a la condición inicial en la evolución? Repite los resultados para $n = 60$ iteraciones.

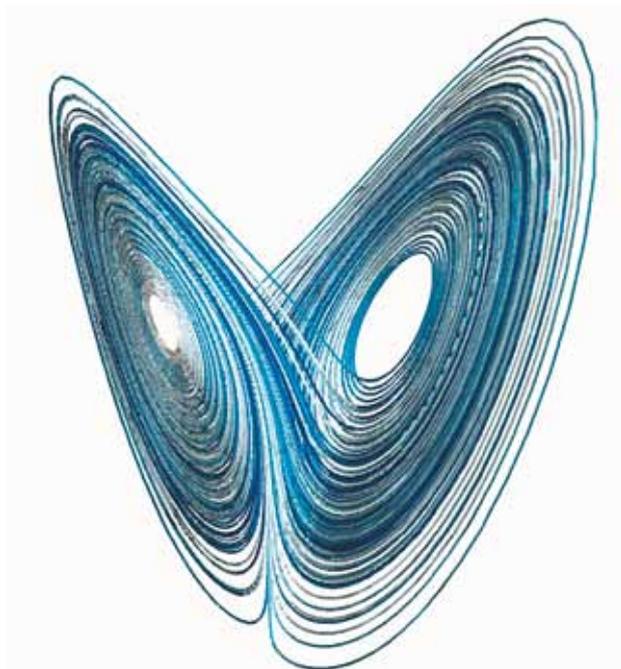


Figura 3. Una solución del atractor de Lorenz. (Wikipedia). Autor: Agarzago. Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Lorenz_system.

manera las ideas expuestas por Poincaré encontraron su refrendo en los trabajos de Lorenz. Lorenz publicó sus resultados en 1963, en un artículo titulado "Deterministic Non-periodic Flow" en la revista *Journal of the Atmospheric Sciences*. Aunque este artículo permaneció en un segundo plano durante una década, más tarde desencadenó una intensa investigación en los llamados sistemas caóticos.

EL PRONÓSTICO DEL TIEMPO MEDIANTE MÉTODOS NUMÉRICOS Y SUS ORÍGENES

El primer paso hacia el pronóstico del tiempo con técnicas numéricas fue dado por **Lewis Fry Richardson** (1881-1953). Richardson creía que era posible resolver

las complejas ecuaciones matemáticas que describían la dinámica de la atmósfera mediante cálculos que involucraban pequeños pasos temporales. Describió sus ideas en el libro *Predicción del tiempo por procedimientos numéricos* publicado en 1922. En su libro, Richardson imagina la "fábrica de pronósticos":

"Después de mucho pensar, ¿no podríamos jugar con la fantasía? Imagina una gran sala, como un teatro, salvo que sus galerías rodean todo el escenario. Las paredes de esta cámara están pintadas formando un mapa del globo terráqueo. El techo representa las regiones polares, Inglaterra está en el gallinero, los trópicos en la galería más alta, Australia en la más baja y la Antártica en la platea. Una miríada de calculistas trabajan sobre el tiempo de la parte del mapa sobre el que se sientan, y cada uno atiende solo a una ecuación o parte de ella.

El trabajo en cada región es coordinado por un oficial de alto rango. Numerosos pequeños carteles luminosos muestran los valores instantáneos para que los calculistas cercanos puedan leerlos. Desde la platea se alza un gran pilar hasta media altura de teatro que se remata con un púlpito. En él se sienta el hombre a cargo de todo el teatro; está rodeado de varios asistentes y mensajeros. Una de sus tareas es la de mantener una velocidad uniforme en el progreso del cálculo de las distintas partes del globo. En este sentido es como un director de

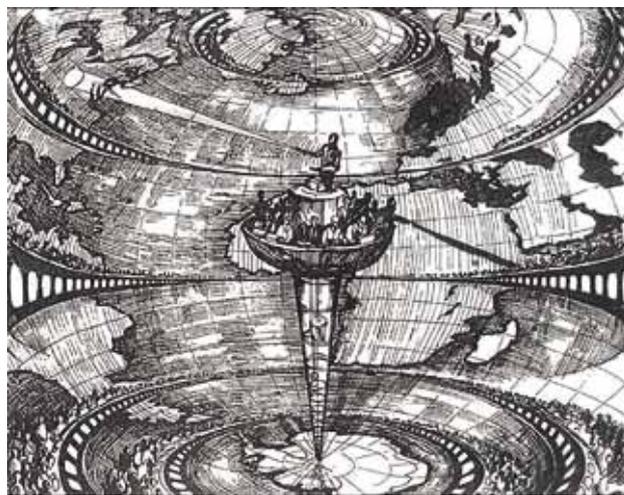


Figura 4. Representación de la fábrica de pronósticos de Richardson. Imagen por cortesía de L. Bengtsson.

orquestra en el que los instrumentos son reglas de cálculo y calculadoras mecánicas. En lugar de llevar una bauta maneja un haz de luz rosada que proyecta en las regiones que han adelantado al resto en el cálculo, y un haz de luz azul sobre aquellas que se quedan atrás.”

Esta descripción resulta muy evocadora y guarda una estrecha relación en muchos aspectos con la moderna **predicción numérica** del tiempo en superordenadores. Efectivamente, en estos ordenadores las complejas ecuaciones de la atmósfera se resuelven en pequeños pasos temporales. En cada paso las variables atmosféricas se conocen en un conjunto discreto de puntos sobre una malla espacial. La tarea de transformar las ecuaciones originales en los pasos que debe ejecutar el ordenador ha dado lugar a toda una rama de las matemáticas, el cálculo numérico.

En la época de Richardson, sin embargo, no existían los ordenadores y los tediosos cálculos se elaboraban por personas llamadas calculistas. Para poner en práctica sus ideas, Richardson quiso hacer un pronóstico sobre varias magnitudes que representaban el estado atmosférico de la Tierra. Usó como dato inicial mapas del tiempo del 20 de mayo de 1910 producidos por el meteorólogo **Vilhelm Bjerknes** (1862-1951). Aunque el pronóstico de Richardson falló, pues predecía un aumento de presión enorme, sus ideas fraguaron y con el paso del tiempo han resultado ser asombrosamente próximas a los métodos modernos de predicción del tiempo.

La predicción numérica del tiempo comenzó a hacerse realidad a mediados de los años cuarenta del siglo XX, con la construcción de ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), el primer ordenador electrónico. Era un enorme aparato con más de 17.000 tubos de vacío, que pesaba 27 toneladas, ocupaba 167 m² y consumía 150 kw para funcionar. Fue concebido por los ingenieros **John Mauchly** (1907-1980) y **J. Presper Eckert Jr.** (1919-1995) de la Universidad de Pensilvania. **John von Neumann** (1903-1957) y sus colaboradores en el ámbito de la meteorología teórica en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton percibieron el potencial de estas máquinas para la predicción del tiempo e hicieron el primer pronóstico sobre un día en abril de 1950. Para ello se basaron en los modelos matemáticos simplificados desarrollados por el grupo dirigido por

Jule Charney (1917-1981). El cálculo duró 24 horas y sus resultados demostraron la factibilidad de la predicción numérica del tiempo.

EL PRONÓSTICO DEL TIEMPO EN LA ACTUALIDAD

En la actualidad los ordenadores son mucho más rápidos y los centros de predicción del tiempo que existen en todo el mundo ejecutan miles de modelos, algunos útiles para predicciones locales y otros para predicciones globales. Los modelos meteorológicos son cada vez más sofisticados, incorporan la rotación de la Tierra y la interacción con la Tierra y su geografía y el océano. Además, se incluyen las observaciones que se logran cada vez con métodos más sofisticados y precisos como los radares y los satélites.

El radar es un instrumento electrónico que mide con radiación electromagnética. Los radares para las medidas atmosféricas emiten impulsos muy cortos de haces de ondas de radio. Objetos como las gotas de lluvia, los cristales de nieve, el granizo, los insectos o las partículas de polvo reflejan parcialmente las ondas hacia la antena. Las señales reflejadas se procesan electrónicamente y se convierten en imágenes que muestran la localización, el tipo de nubes y la intensidad de la precipitación.

Los satélites proporcionan la mayor parte de las mediciones atmosféricas. Los satélites destinados a este tipo de mediciones incorporan cámaras sensibles a la radiación visible y al infrarrojo de modo que detectan las nubes tanto de día como de noche. Las nubes frías, que son las ubicadas a mayor altura, se muestran con colores brillantes y blancos, mientras que las más cálidas (situadas a menor altura) aparecen en colores oscuros y grises.

Los datos y las observaciones se incorporan a los modelos de predicción mediante el procedimiento de **asimilación de datos**. El objetivo de la asimilación de datos es producir en las tres dimensiones del espacio y en el



Figura 5. Imagen de satélite obtenida por MODIS del Huracán Katrina tomada el 28 de Agosto de 2005. Fuente: http://www.nasa.gov/mission_pages/hurricanes/archives/2005/h2005_katrina.html.

tiempo una representación consistente con el estado físico real de la atmósfera. Para ello las variables observadas se incorporan a un modelo de un sistema real programado en un ordenador, de forma que el modelo cuenta para sus predicciones con la información aportada por las observaciones y medidas.

Para la asimilación de datos se usan numerosas herramientas matemáticas: la estadística, la teoría de los procesos estocásticos, la teoría del procesado y filtrado de señales, el control óptimo sobre problemas gobernados por ecuaciones en derivadas parciales, la optimización y la teoría de problemas inversos.

LIDIAR CON LA INCERTIDUMBRE

A pesar de los avances realizados por la meteorología moderna, uno de los retos en el pronóstico del tiempo hoy sigue siendo abordar las incertidumbres de las predicciones. Existen dos fuentes que las originan. Por un lado, los errores introducidos por el conocimiento imperfecto de las condiciones iniciales y que se amplifican debido a la naturaleza caótica del problema. Por otro lado, los errores introducidos por las aproximaciones usadas en la formulación de los modelos que hacen que distintos modelos proporcionen distintas predicciones.

Por esta razón una tendencia actual en la predicción del tiempo es el uso del **pronóstico por conjuntos**. Esta técnica utiliza muchos pronósticos para efectuar una media y además obtiene una estimación del nivel de incertidumbre de los resultados. El conjunto de diagnósticos se consigue ejecutando un único modelo con leves modificaciones de las condiciones iniciales o bien comparando las predicciones que facilitan los muchos modelos que existen.

Existen muchos centros y agencias alrededor del mundo que realizan pronósticos del tiempo: en Estados Unidos, los Centros de Predicción Ambiental (NCEP); en Europa, el Centro Europeo para Pronósticos de Medio-Alcance (ECMWF); en distintos países como España, Reino Unido, Francia, Japón, Canadá, etcétera, las agencias meteorológicas nacionales. Cada organismo cuenta para este fin con sus propios modelos que utilizan distintas aproximaciones, todas ellas plausibles, pero que en general proporcionan diferentes resultados.

EL CLIMA Y SU EVOLUCIÓN

El clima se corresponde con la descripción del estado dinámico de sistema tierra-atmósfera pero en un sentido más amplio que el que proporciona la meteorología. Se extiende sobre largos periodos de tiempo (años, décadas, siglos, milenios) y sobre grandes áreas (continentes, el globo terráqueo). Son muchos los factores

que configuran el clima: las interacciones entre la Tierra y el Sol, los cambios en la órbita de la Tierra, la distribución de océanos y continentes, los componentes químicos de la atmósfera, las erupciones volcánicas, la interacción entre los seres vivos –especialmente especies fotosintéticas y su distribución en mares y tierra– y el medio, así como los efectos de las acciones antropogénicas.

La atmósfera de la Tierra no ha sido siempre igual a la actual. Los científicos conjeturan que la atmósfera primitiva habría estado compuesta de hidrógeno, helio y otros gases simples que se habrían perdido. Las incontables colisiones con meteoritos que posiblemente acontecieron durante los primeros estadios de existencia de la Tierra habrían generado un calor tremendo en su superficie. En este proceso se habrían emitido muchos gases desde su superficie fundida. Posteriormente la Tierra se habría enfriado y solidificado. A través de los volcanes la roca fundida habría, ocasionalmente, irrumpido de nuevo en la superficie de la Tierra, continuando la emisión de gases. La acumulación de estos gases sobre la superficie habría formado una atmósfera secundaria primitiva.

¿Cómo era esta atmósfera? Si aceptamos que hace millones de años las emisiones de los volcanes podrían haber sido similares a las actuales, entonces la actividad volcánica de tiempos antiguos pudo generar dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y dióxido de azufre. El examen de las rocas más antiguas, las que fueron expuestas a la atmósfera primitiva, indica una deficiencia de oxígeno en esta atmósfera. En efecto, si hubiera existido oxígeno en la atmósfera primitiva, se habría combinado con el hierro de estos depósitos de rocas antiguas, pero esta evidencia no se ha encontrado. El oxígeno que apareció en la atmósfera lo hizo por la actividad biológica, a través de la fotosíntesis de organismos unicelulares llamados cianobacterias, o también algas verde-azuladas, que vivieron en los océanos hace 3.000 millones de años. Conforme el oxígeno se acumulaba en la atmósfera, se pudieron formar ciertas cantidades de ozono que sirvieron como capa protectora de la radiación ultravioleta solar. Además, el agua del océano habría actuado como escudo protector adicional de la radiación cósmica y en con-

secuencia bajo la superficie oceánica se habrían dado las circunstancias que habrían permitido el desarrollo de la vida en la Tierra. Cuando la capa de ozono se hizo lo suficientemente extensa, las plantas y los animales pudieron encontrar las condiciones para poblar los continentes.

VARIACIONES EN EL CLIMA

Los científicos han analizado los cambios climáticos del pasado examinando restos biológicos (plantas y animales fósiles) y geológicos (sedimentos oceánicos) y han encontrado evidencias de que en el pasado el clima de la Tierra experimentó cambios bruscos. Estos cambios bruscos en las condiciones del hábitat justificarían las extinciones masivas de especies de seres vivos que ha habido en la historia de la Tierra. Por ejemplo, la extinción masiva del Cretácico-Terciario ocurrida hace 65 millones de años en la que desapareció el 50% de la biodiversidad. Mucho peor fue la extinción masiva del Pérmico-Triásico, también llamada la Gran Mortandad, ocurrida hace 250 millones de años; en ella desaparecieron el 70% de las especies de vertebrados y el 95% de las especies marinas.

Una de las causas que los científicos señalan para estas extinciones son los impactos de meteoritos ¿Cómo afecta al clima un gran impacto? La energía del impacto de un asteroide de unos 10 km de diámetro que alcance la Tierra con una velocidad típica de 70.000 km/h-100.000 km/h puede producir un aumento de temperatura local de decenas de miles de grados, que serían suficientes para evaporar instantáneamente decenas de miles de km³ de suelo y roca, produciendo un gran cráter de impacto. El polvo resultante, al pasar a la atmósfera, reduciría la radiación solar sobre la Tierra, enfriándola significativamente. La colisión probablemente produciría enormes olas a través del océano y desencadenaría terremotos y actividad volcánica a cientos y miles de kilómetros de distancia.

Los climatólogos, siguiendo la teoría de Milankovitch, también adscriben los cambios en el patrón climático

de la Tierra a las variaciones cíclicas de la órbita de la Tierra en torno al Sol. Estas se producirían por un lado por cambios en la excentricidad, es decir, en la desviación de la órbita de la Tierra del círculo perfecto. Por otro lado, también habrían influido las variaciones en la posición del plano ecuatorial de la Tierra con respecto al plano de su órbita (inclinación axial). Finalmente, también serían importantes las variaciones en la precesión, es decir, en la orientación del eje de rotación de la Tierra.

El clima de la Tierra en el pasado también puede haberse visto afectado por la deriva de los continentes. La teoría de la deriva continental fue propuesta en 1912 por el geólogo alemán Alfred Wegener, quien propuso que originariamente todos los continentes estaban unidos formando un macro-continente llamado Pangea, rodeado de un solo océano, Panthalassa. Estas ideas se incluyeron posteriormente en la teoría de la tectónica de placas, según la cual la parte más externa de la Tierra está formada por placas móviles. Los continentes están en estas placas y se mueven con ellas. En los límites de estas placas se encuentran las zonas de subducción, donde se localiza el 95% de la energía sísmica del planeta y la mayor parte de los volcanes activos de la Tierra. Durante las erupciones volcánicas se expelen toneladas de polvo y cenizas en la atmósfera. Algunas veces estas alcanzan niveles por encima de la troposfera y se extienden por toda la Tierra. Las partículas

volcánicas por un lado intensifican la formación de nubes y por otro, de modo parecido a como actúa el polvo producido tras un gran impacto, reflejan la luz solar y eventualmente enfrían la superficie de la Tierra. Así la erupción del monte Pinatubo en Filipinas el 15 de junio de 1995 redujo la temperatura media del planeta en medio grado centígrado durante el subsiguiente año.

El clima también puede variar si se altera el estado de equilibrio de la atmósfera que depende de su composición química. Los volcanes y la actividad humana –por ejemplo a través de procesos industriales– emiten gases que pueden afectar al estado actual de nuestra atmósfera. Entre otros, estos gases son el CO_2 , el metano, el óxido de nitrógeno y los clorofluorocarburos (CFC) (este último de origen antropogénico). La presencia de estos gases en la atmósfera contribuye al efecto invernadero, por el que aumentaría la temperatura media del planeta. Además, se ha probado que la existencia de las moléculas de CFC en la estratosfera ha jugado un papel importante en la formación del agujero en la capa de ozono. Este agujero consiste en la disminución de ozono en la baja estratosfera cada primavera austral y viene observándose desde los años setenta del siglo pasado. Debido a su impacto en el medio ambiente, la manufactura de componentes que contienen CFC ha sido prohibida por el protocolo de Montreal. Un papel antagónico al descrito lo desempeñan seres vivos como

EJERCICIO

Experimento: haz Dióxido de Carbono (CO_2)

El CO_2 lo fabrica tu cuerpo al respirar, y se elimina en la espiración o al exhalar el aire de los pulmones. El CO_2 también puede fabricarse de otras formas como detallamos a continuación:

Material: Tiza, $\frac{1}{2}$ vaso de vinagre, una botella de 1 litro con su tapón, una vela, un vaso pequeño.

Procedimiento: Introduce la tiza triturada en la botella. Añade lentamente el vinagre sobre la tiza y al terminar tapa la botella. Observa las burbujas que se forman en

la botella. Son de dióxido de carbono. Enciende la vela e introdúcela en un pequeño vaso. Destapa la botella y “vierte” el gas sobre la vela. Observa que la vela se apaga.

Explicación: Cuando mezclas un ácido como el vinagre (ácido acético) con un carbonato como el carbonato de calcio (la tiza), reaccionan produciendo el gas dióxido de carbono. Este gas es más pesado que el aire, y por eso puede verterse sobre la vela. Al hacerlo se desplaza el oxígeno y la vela se apaga porque sin oxígeno no hay combustión.

el fitoplancton presente en grandes extensiones oceánicas. Su actividad fotosintética actúa como sumidero del CO_2 atmosférico y contribuye de modo muy importante a la emisión de O_2 a la atmósfera.

EPÍLOGO

El pronóstico del tiempo con técnicas numéricas involucra el uso de modelos matemáticos de la atmósfera. Para una mayor precisión en las predicciones se requiere la toma de continuas medidas en la atmósfera con radares y satélites que se incorporan a los modelos, la manipulación de grandes conjuntos de datos y el uso de sofisticadas herramientas procedentes de diversas áreas de las matemáticas. Con estos esfuerzos la predicción del tiempo ha avanzado significativamente en el último siglo y ha conducido a un grado de precisión que cada año salva incontables vidas y propiedades. La predicción del tiempo con métodos numéricos puede considerarse sin lugar a dudas uno de los logros más significativos del siglo XX, y sobre el que de forma regular cada vez hay más y más demanda.

Describir la evolución del clima en la Tierra es más complicado que la mera predicción meteorológica, ya de por sí difícil. El clima y su evolución está lleno de incertidumbres y, como se ha descrito, en él influyen multitud de factores y fenómenos que no intervienen en la perspectiva meteorológica porque esta es mucho más local en espacio y tiempo. Entre los factores que afectan al clima existe un complejo entramado de interacciones, que a veces no se conocen o se han estudiado poco, por lo que su impacto a largo plazo es difícil de determinar.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Andrews, D. G. (2000): *An introduction to atmospheric physics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Este libro, de un nivel relativamente avanzado, cubre un amplio espectro de temas de la física atmosférica.

Ilustra cómo la física ayuda a entender importantes aspectos del comportamiento atmosférico. Asume que el lector parte de un conocimiento de física y matemáticas como el que se adquiere en los primeros cursos de la universidad.

Bohren, C. F. (1987): *Clouds in a glass of beer*. Mineola, New York: Dover Publications.

Este libro describe experimentos sencillos de física atmosférica. Abarca un espectro amplio que incluye desde conceptos formales hasta aspectos más divulgativos e informales. Los profesores encontrarán ideas sencillas para hacer demostraciones prácticas en clase.

Colman, B. R. y Potter, T. D. (2003): *Handbook of weather, climate and water*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, col. Wiley Interscience.

Este es un libro para profesionales en el que cada capítulo presenta una panorámica o visión general del estado del arte de un tema relacionado con la meteorología y el clima. Entre estos temas se incluyen la turbulencia, la teoría del caos, la predictibilidad atmosférica, la predicción numérica del tiempo, los métodos de observación atmosférica modernos, los instrumentos y su calibración, etcétera.

Feynman, R. (2005): *The Feynman lectures on physics*, vol. 2. (ed. rev. y def.). Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.

En este libro de texto clásico, Feynman describe de manera entusiasta, clara, profunda y divertida los conceptos básicos de la física. En el segundo volumen dedica dos capítulos a los fluidos. En ellos presenta con gran intuición y de modo muy ilustrativo las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos. Pone de manifiesto las dificultades que entraña la resolución de estas ecuaciones y la gran variedad de soluciones que presentan.

Houghton, J. T. (2002): *The physics of atmospheres*. Cambridge: Cambridge University Press.

Libro introductorio que presenta de manera concisa los procesos físicos que gobiernan la estructura y dinámica

de la atmósfera. Tiene un capítulo dedicado al caos y la predictibilidad atmosférica.

Lynch, P. (2006): *The emergence of numerical weather prediction: Richardson's dream*. Cambridge: Cambridge University Press.

Este libro proporciona una excelente revisión sobre cómo surgió la predicción numérica del tiempo. Desde las ideas pioneras de Lewis Fry Richardson se requirieron muchos avances para que su sueño se hiciera realidad: obtener una mayor comprensión de la dinámica atmosférica, diseñar algoritmos numéricos para integrar las ecuaciones de la atmósfera que fueran computacionalmente estables, recoger observaciones regulares y precisas del estado de la atmósfera y finalmente disponer de potentes y eficientes ordenadores. Se incide en todos los retos que hubo que afrontar hasta que las modernas predicciones numéricas del tiempo fueron posibles.

Sorbjan, Z. (1996): *Hands-on meteorology: stories, theories, and simple experiments*. Boston: American Meteorological Society.

Este libro explica de manera divulgativa y amena los conceptos básicos de la meteorología. Proporciona muchas notas históricas y experimentos sencillos diseñados para entender la ciencia.

Strogatz, S. H. (1994): *Nonlinear dynamics and chaos*. Cambridge: Perseus Books Publishing.

Libro introductorio sobre los conceptos matemáticos básicos de la dinámica no lineal y el caos. Estas nociones subyacen a las ideas de Poincaré sobre impredecibilidad y determinismo. Dedicar un capítulo a explicar el modelo de Lorenz y sus implicaciones.

MATERIALES AUXILIARES

LIBROS

Goethe, J. W. (2011): *El juego de las nubes*. Madrid: Nórdica.

Libro que contiene reflexiones y dibujos sobre meteorología y ciencia en general, que Goethe diseñó a partir de 1820. Se ocupa del estudio de las nubes y del estado de los cielos, con el objetivo de abordar lo incierto desde lo más cierto (lucha de gigantes cósmicos, antagonismo entre el bien y el mal, etcétera). El libro está magníficamente ilustrado por Fernando Vicente.

Southall, I. (1987): *Siete chicos de Australia*. Barcelona: Noguer (ed. orig.: Hills End, 1962).

Siete niños y su maestra exploran una cueva cuando se quedan atrapados por una intensa tormenta. Rodeados de montañas junto a un río desbordado, no pueden pedir ayuda y se enfrentan a una lucha por la supervivencia. A la vez, lidian con sus pérdidas y con el misterio que rodea al antiguo arte aborigen encontrado en la cueva.

PÁGINAS WEB

<http://www.ecmwf.int/>. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

<http://www.noaa.gov/>.

http://celebrating200years.noaa.gov/foundations/numerical_wx_pred/welcome.html#early. NOAA-National Oceanic and Atmospheric Administration.

<http://ncar.ucar.edu/>. National Center for Atmospheric Research.

<http://www.nasa.gov/>. National Aeronautics and Space Administration.

PELÍCULAS

Atrapado en el tiempo (Harold Ramis, 1993). Phil, el hombre del tiempo de una cadena de televisión, es enviado un año más a Punxstawnwey, a cubrir la información del festival del Día de la Marmota. En el viaje de regreso, Phil y su equipo se ven sorprendidos por una tormenta que les obliga a regresar a la pequeña ciudad. A la mañana siguiente, al despertarse, Phil comprueba

atónito que comienza otra vez el Día de la Marmota. La película permite una reflexión sobre la predicción meteorológica basada en premisas científicas o en tradiciones (como la marmota y su sombra).

Waterworld (Kevin Reynolds, 1995). Los casquetes polares se han derretido y han inundado el mundo, que ahora está totalmente cubierto de agua. Los supervivientes han optado por reagruparse en pequeños atolones que han construido ellos mismos o bien convertirse en nómadas y vagar por los océanos en pequeñas embarcaciones. Uno de ellos es Marinero (Kevin Costner), un humano que posee branquias para poder respirar debajo del agua. Su vida cambia cuando rescata a Helen y a su hija adoptiva Enola de los malvados Smokers, liderados por el Diácono (Dennis Hopper). Ahora, los tres decidirán ir en busca de la Tierra Seca, el único lugar en todo el planeta que todavía no ha sido inundado, siguiendo el mapa que Enola tiene tatuado en la espalda. La película es una reflexión sobre un futuro posible si el hombre no cambia su actitud ante el planeta.

Twister (Jan de Bont, 1996). Película que narra los trabajos de los investigadores de los tornados, auténticos cazadores de estos fenómenos devastadores.

Armageddon (Michael Bay, 1998). Película de ciencia ficción y cine de catástrofes producida por Jerry

Bruckheimer y protagonizada por Bruce Willis, Billy Bob Thornton, Ben Affleck, Liv Tyler, Owen Wilson, Will Patton, Michael Clarke Duncan, Peter Stormare y Steve Buscemi. En ella, un grupo de perforadores de plataformas petrolíferas son enviados por la NASA al espacio para taladrar la superficie de un enorme asteroide que amenaza la Tierra y destruirlo con una bomba.

El día de mañana (Roland Emmerich, 2004). Película estadounidense estrenada en 2004 y protagonizada por Jake Gyllenhaal y Dennis Quaid. Es una hipótesis de las conclusiones expuestas en la tesis del cambio climático, que en la ficción revelan las investigaciones del climatólogo Jack Hall (Dennis Quaid): el calentamiento global podría provocar un cambio abrupto y catastrófico en el clima del planeta Tierra.

2012 (Roland Emmerich, 2009). Película estadounidense protagonizada por John Cusack. Está centrada en las consecuencias catastrofistas del fin del calendario maya.

DOCUMENTAL

Cloudspotting. Este documental de la BBC no es un tratado de nubes sino un recorrido ameno y visual por los diferentes tipos de nubes que se forman en la atmósfera. Disponible en <http://www.bbc.co.uk/programmes/b00k99th>.