

# ORIGEN Y DESARROLLOS ACTUALES DE LA PREDICCIÓN METEOROLÓGICA

JOSÉ MIGUEL VIÑAS RUBIO

Secretario de ACOMET y consultor de la Organización Meteorológica Mundial

## RESUMEN

*La Meteorología es una ciencia relativamente moderna si la comparamos con otras disciplinas científicas. Sus principales bases teóricas no quedaron establecidas hasta las primeras décadas del siglo xx, gracias a la labor de un grupo de brillantes meteorólogos suecos y noruegos, con Vilhem Bjerknes a la cabeza. Sin embargo, no fue hasta la década de 1950 cuando la Meteorología dio su gran salto cualitativo, gracias a la llegada de los ordenadores, lo que permitió el desarrollo y la puesta en marcha de las predicciones meteorológicas. Desde entonces, paralelamente al aumento exponencial de la capacidad de cálculo computacional, su desarrollo ha sido imparable, alcanzando en la actualidad un alto nivel de confianza.*

## DE LA PREDICCIÓN EMPÍRICA A LA CIENTÍFICA

Los orígenes de la predicción del tiempo se remontan prácticamente a los orígenes de la humanidad. Ya nuestros ancestros, al observar la bóveda celeste, comenzaron a establecer primitivas reglas de predicción, basadas en las tonalidades del cielo, en el tipo de nubes o, algo más tarde, en el lugar de procedencia del viento. Fueron dándose cuenta de que los cambios en el aspecto del cielo solían traducirse en cambios de tiempo. Esto era importante para

ellos, ya que su supervivencia dependía en gran medida del factor ambiental.

Con el posterior desarrollo de la agricultura, cobró una mayor importancia conocer con antelación los cambios meteorológicos (la llegada de lluvias, las posibles heladas, el temible granizo...). Comenzaron por aquel entonces a establecerse una serie de creencias en torno al tiempo y al clima que se fueron transmitiendo oralmente de padres a hijos. Algunas de ellas siguen todavía hoy en día arraigadas en el ámbito rural. Muchas de esas creencias, sobre todo las que tratan de prever el tiempo a largo

plazo (tales como las cabañuelas o las témporas), carecen de base científica, a pesar de lo cuál, han resistido el paso de los siglos.

La predicción meteorológica basada en el método científico no surgió hasta mediados del siglo XIX, de la mano de un reputado astrónomo de la época: el francés Urbain Le Verrier (1811-1877). Por aquel entonces, ya se llevaban a cabo observaciones meteorológicas diarias en las principales ciudades europeas, aunque todavía no se contaba con la capacidad de elaborar pronósticos. Dicha circunstancia cambió rápidamente gracias al desarrollo del telégrafo y a un episodio meteorológico ocurrido durante una contienda militar.

En la Guerra de Crimea —ocurrida entre 1853 y 1856— los rusos se enfrentaron a ingleses y franceses. El 14 de noviembre de 1854, una fuerte tormenta destruyó la mayor parte de la flota anglo-francesa que se hallaba fondeada en el puerto de Balaclava, a orillas del Mar Negro. A raíz de aquel incidente, el emperador de Francia, Napoleón III, encargó a Le Verrier —responsable del Observatorio de París— que investigara el asunto, para saber si algo así podía haberse anticipado. Le Verrier se dedicó entonces a viajar por distintos observatorios de Europa para recopilar datos, deduciendo a partir de ellos que un sistema depresionario (una borrasca) se fue desplazando por distintos países europeos antes de alcanzar la Península de Crimea. De haberse conocido esos datos en tiempo casi real, el desastre podría haberse evitado o al menos minimizado. Le Verrier sugirió la instalación de una pequeña red de estaciones meteorológicas en los alrededores de París conectadas por telégrafo, con el fin de emitir avisos de mal tiempo en caso necesario.

Durante la segunda mitad del siglo XIX y primeras décadas del XX, las estaciones telegráficas fueron compartiendo instalaciones con los propios observatorios meteorológicos, de manera que los meteorólogos de los diferentes países comenzaron a llevar a cabo las primeras predicciones. No obstante, tuvieron que transcurrir aún varias décadas hasta el

inicio la predicción numérica del tiempo; base de los modelos en que se basan los pronósticos en la actualidad.

## LAS BASES TEÓRICAS DE LA PREDICCIÓN DEL TIEMPO

El artífice de ese importante salto cualitativo en la predicción meteorológica fue el noruego Vilhelm Friman Koren Bjerknes (1862-1951), conocido mundialmente por su primer nombre y apellido: Vilhelm Bjerknes, y apodado «el padre de la Meteorología Moderna». Vilhem fue padre e hijo de otros dos Bjerknes que también alcanzaron fama mundial.

Su padre, Carl Anton Bjerknes, fue profesor de Matemática aplicada en la Universidad de Oslo y contribuyó de forma notable al desarrollo de la Física durante la segunda mitad del siglo XIX, destacando sus trabajos de hidrodinámica, en los que implicó al propio Vilhelm. El hijo de éste —Jakob Bjerknes— también ocupa un lugar muy destacado en el campo de la Meteorología. A él le debemos el concepto de frente y el de masa de aire. A pesar de esos grandes logros, fue Vilhelm el que transformó de manera definitiva la ciencia meteorológica, pasando de ser una disciplina básicamente empírica a una rama de la Física de pleno derecho: la Física del Aire.

Vilhem Bjerknes nació en Christiania, la actual Oslo, el 14 de marzo de 1862, si bien pasó parte de su vida en Francia y, sobre todo, en Alemania. A los veintiocho años se convirtió en ayudante del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), a quien debemos el descubrimiento de las ondas electromagnéticas, llamadas en su honor ondas hercianas. Bjerknes trabajó algunos años en el laboratorio de Hertz —en la Universidad de Bonn— e investigó algunas de las cuestiones fundamentales sobre las ondas hercianas, lo que, algunos años más tarde, permitirían la invención de la radio. El 1892 Bjerknes volvió a Noruega y allí se doctoró sobre estas investigaciones

llevadas a cabo en Alemania, bastante alejadas aún de la Meteorología.

Durante bastantes años, Vilhelm Bjerknes estuvo enfrascado en arduas cuestiones de Física Teórica que terminaron por llevarle a un callejón sin salida. Se acercaba el cambio de siglo y la Física estaba comenzando a experimentar una de sus principales revoluciones. Bjerknes se sintió entonces aislado, ya que sus

*A principios del siglo XX esta disciplina científica estaba en pañales; la Meteorología teórica estaba dando sus primeros pasos, pero seguía siendo una ciencia eminentemente empírica, cultivada por personas que, en su mayoría, no tenían grandes conocimientos de Física*

investigaciones no contaban con el respaldo de sus colegas. Tenía ya cerca de los cuarenta años y todavía la Meteorología no había llamado a su puerta.

Hacia 1896 cayó en manos de Bjerknes un trabajo de un físico polaco sobre la aparición de remolinos en fluidos, que llamó su atención. El tema le interesó mucho y al año siguiente presentó una publicación con la primera versión de su famoso teorema de la circulación. En ese momento no pensaba todavía en su

aplicación al movimiento de la atmósfera. Algunos meteorólogos de la época le hicieron ver la utilidad de su teorema y Bjerknes comenzó a mostrar interés por la Geofísica y a desarrollar sus ideas. Recobró la ilusión y nació entonces su verdadera vocación. En 1904 escribió una carta al oceanógrafo Hansen, en la que hacía la siguiente declaración de intenciones. Decía: «No puedo rehuir más tiempo la respuesta a lo que verdaderamente quiero hacer, y creo que sólo hay una: resolver el problema de predecir el estado futuro de la atmósfera y el océano».

Con la anterior frase, Bjerknes sentó las bases de la predicción numérica del tiempo, lo que para él era el mayor logro que podía conseguir la aplicación práctica de la Física del Aire. A principios del siglo xx esta disciplina científica estaba en pañales. La Meteorología teórica estaba dando sus primeros pasos, pero seguía siendo una ciencia eminentemente empírica, cultivada por personas que, en su mayoría, no tenían grandes conocimientos de Física. Bjerknes fue el primero en trazar el camino que desde entonces ha ido recorriendo la Meteorología.

Bjerknes sugirió que el problema de la predicción del tiempo podía ser visto como un problema determinista. Para él, todo pasaba por conocer con la suficiente precisión el estado de la atmósfera en un momento dado (las condiciones iniciales), lo mismo que las leyes según las cuáles se desarrolla un estado atmosférico a partir del precedente. Esta visionaria concepción de Bjerknes es la que los actuales modelos de predicción tratan de llevar a la práctica. No obstante, el propio Bjerknes se dio cuenta de que el camino no iba a ser fácil, ya que el sistema de ecuaciones matemáticas a resolver era no lineal, lo que no permitía obtener soluciones exactas.

## EL SUEÑO DE RICHARSON

A pesar de ser el primero en establecer las bases teóricas de la predicción numérica del

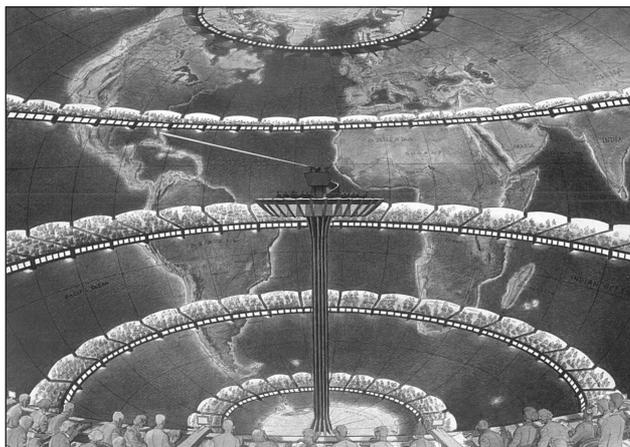


FIGURA 1.—Representación gráfica de «El sueño de Richardson»

tiempo, quien llevó a la práctica sus ideas fue el matemático inglés Lewis Fry Richardson (1881-1953). Para ello ejecutó un método matemático de su invención, conocido como el método de las diferencias finitas, lo que le permitió resolver, de manera aproximada, las ecuaciones en derivadas parciales que aparecían en el problema de la predicción del tiempo. Richardson aprovechó sus viajes por Francia como conductor de ambulancias, durante la I Guerra Mundial, para recopilar datos meteorológicos de un día concreto, el 20 de mayo de 1910. Su objetivo era pronosticar el tiempo a seis horas vista en una pequeña región francesa.

El resultado fue insatisfactorio, no sólo porque el tiempo previsto no se ajustó al tiempo acontecido, sino porque en efectuar todos los cálculos a mano —no existían ordenadores por aquel entonces— empleó nada menos que seis semanas. Años más tarde, en un libro donde dio a conocer sus investigaciones, dijo que «harían falta 64.000 personas trabajando por turnos para prever el estado de la atmósfera con mayor rapidez que la de su evolución real». En un dibujo muy conocido de ese libro aparece lo que se ha bautizado como «El sueño de Richardson»: una fábrica de predicciones meteorológicas formada por miles de calculadores humanos trabajando de forma sincronizada bajo la batuta de una especie de

director de orquesta. Con la llegada de los ordenadores, en los años cincuenta, el sueño de Richardson se hizo realidad.

## LA PRIMERA PREDICCIÓN HECHA CON UN ORDENADOR

El punto de inflexión llegó en 1950 gracias a ENIAC, la primera computadora electrónica de la historia. En realidad ENIAC nació algo antes, en 1943, en la Universidad de Pennsylvania, aunque no terminó de construirse hasta 1946. Uno de sus principales impulsores fue el matemático John Von Neumann (1903-1957), quien pronto se dio cuenta de que el problema de la predicción meteorológica era ideal para probar las capacidades de ENIAC. En su época fue la máquina más grande del mundo. Ese primer ordenador pesaba 27.000 kilos y ocupaba una superficie de 63 metros cuadrados. Tenía 17.468 válvulas de vacío, que era lo que más quebraderos de cabeza daba a los operarios que se encargaban de su mantenimiento, ya que aproximadamente cada diez minutos se estropeaba una, que inmediatamente debía reponerse, y era bastante laborioso localizar la válvula y sustituirla. A pesar de las dificultades, ENIAC, entre otros muchos cálculos, permitió llevar a cabo la primera predicción numérica del tiempo.

Esa predicción fue bastante mejor que la que hizo Richardson varias décadas antes, lo que marcó el camino a seguir a sus responsables y sus discípulos, a pesar de lo elemental que era el modelo numérico de predicción que desarrollaron. El meteorólogo estadounidense Jule G. Charney (1917-1981), con la ayuda de Von Neumann y del noruego Ragnar Fjørtoft fueron los padres de la criatura. Eligieron para ello un modelo barotrópico que algunos años antes había propuesto el meteorólogo sueco Carl-Gustaff Rossby (1898-1957).

El citado modelo barotrópico es un modelo de atmósfera muy simplificado, en el que se

supone que el movimiento del aire es únicamente horizontal. Rossby había planteado una ecuación del movimiento en la atmósfera no basada en las diferencias de presión, sino del viento, concretamente de la componente vertical de una variable fundamental en dinámica atmosférica como es la vorticidad. Al resolver su ecuación, Rossby obtuvo la velocidad de propagación de unas ondas de gran amplitud que rodeaban cada uno de los dos hemisferios terrestres, desplazándose de Oeste a Este. Estas ondas —llamadas en su honor «ondas de Rossby»— son las que rigen el comportamiento del tiempo en latitudes templadas. Dependiendo de lo onduladas que estén, nos afectan más o menos las borrascas y las entradas de aire frío asociadas a ellas.

Volviendo a la primera predicción meteorológica que llevó a cabo ENIAC, Charney, Von Neumann, Fjörtoft y el resto de miembros de su equipo emplearon treinta y tres días, con sus respectivas noches, en programar y ejecutar tres predicciones para un plazo de veinticuatro horas. Lo que les llevó más tiempo fue, sin duda, la programación. Obtuvieron una evolución futura del movimiento medio de la troposfera que se parecía a la evolución real,

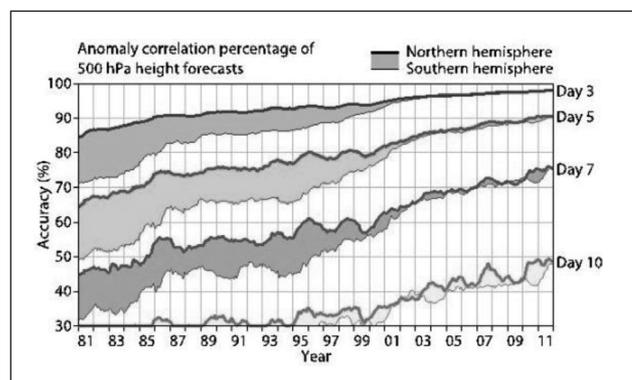


FIGURA 2.—Mejora en la predicción del campo meteorológico de presión al nivel atmosférico de 500 hPa para el Hemisferio Norte, por parte del modelo de circulación global del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (ECMWF), entre los años 1981 y 2011. Observamos, por ejemplo, cómo la fiabilidad en la predicción a cinco días vista ha pasado de ser de un 65 a un 90%

conocida gracias a las observaciones. Fue el pistoletazo de salida del desarrollo de los modelos meteorológicos, una carrera que aún no ha terminado, ya que los actuales modelos no paran de mejorar, ganando en complejidad cada día que pasa. Todo ello ha ido siendo posible gracias a la extraordinaria capacidad de cálculo que, en poco más de sesenta años, han ido adquiriendo los ordenadores.

Llegados a este punto, conviene comentar algunos aspectos básicos acerca de los modelos de predicción en que los meteorólogos basan sus pronósticos, y de los que se nutren las numerosas aplicaciones para smartphones (móviles inteligentes) que ofrecen predicciones meteorológicas para cualquier localidad del mundo.

## LOS MODELOS DE PREDICCIÓN NUMÉRICA

Un modelo consiste en un conjunto de ecuaciones matemáticas para cuya resolución se requieren cálculos muy complejos y laboriosos, de los que se encargan los ordenadores más potentes que existen en la actualidad. Esas ecuaciones dan cuenta de los procesos que tienen lugar en la atmósfera, tales como el movimiento de las masas de aire, la energía que hay en juego o los procesos termodinámicos implicados, y se aplican sobre miles de puntos repartidos a lo largo y ancho de una malla imaginaria que cubre toda la atmósfera. Para construir esa malla se divide toda la superficie terrestre en cuadrículas, como si fuera un gigantesco tablero de ajedrez, y se secciona la atmósfera en varios niveles, de manera que prolongando hacia arriba las cuadrículas conseguimos tener una malla en tres dimensiones sobre la que el modelo calculará la evolución futura de las distintas variables atmosféricas.

Un modelo atmosférico global podemos concebirlo, por tanto, como una enorme malla tridimensional que rodea en su totalidad a

la Tierra y se extiende desde la superficie terrestre hasta la baja estratosfera. El tamaño de rejilla (o *grid*) de un modelo, es el tamaño que tiene de lado cada una de las cuadrículas en que dicho modelo divide la superficie terrestre y los distintos niveles de atmósfera considerados. En la actualidad, el Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo corre su modelo global —el mejor del mundo— para un tamaño de rejilla de 16 kilómetros. Cuesta trabajo concebir la gran cantidad de celdas que considera ese modelo en sus cálculos. Basta con pensar que la longitud de la circunferencia terrestre por el Ecuador ronda los 40.000 kilómetros. El modelo ha de calcular para cada punto de esa inmensa malla las correspondientes ecuaciones. Y a pesar de todo, se confeccionan modelos que a partir de los modelos globales tratan de bajar aún más su resolución, los llamados «modelos de área limitada» (LAM).

En la ejecución de un modelo meteorológico hay tres fases bien diferenciadas. La primera sería la de asimilación de los datos. Diariamente se registran en todo el mundo millones de datos meteorológicos de todo tipo. El modelo debe construir a partir de esos datos (que se distribuyen de forma muy irregular por todo el planeta), un estado inicial; es decir, debe asignar unos valores a cada punto de la malla antes apuntada. Hecho esto, el ordenador se pone a resolver las ecuaciones y mediante una serie de «pasadas» va calculando la evolución futura de variables como la presión, la temperatura o el viento. El resultado final de este proceso de cálculo es una gigantesca matriz de números. El último paso sería la transformación de esa matriz numérica, a través de unas salidas gráficas, en los diferentes campos meteorológicos que tienen a su disposición los meteorólogos, muchos de los cuales se encuentran disponibles a través de Internet.

La fiabilidad de los modelos es bastante alta en la predicción a corto plazo; es decir, no más allá de setenta y dos horas. El grado de

acierto depende mucho de la escala en la que nos movamos y de la época del año. No obstante, podemos hablar de una fiabilidad cercana al 90% en la predicción a dos días. El avance en la predicción numérica ha ido en paralelo al de los ordenadores. Las predicciones a cinco días emitidas en la actualidad tie-

*Todo ello permite generar de forma automática predicciones para decenas de miles de puntos (léase localidades) de todo el mundo, con un horizonte de predicción del orden de la decena de días, asignando a cada variable prevista (temperatura, precipitación, viento...) un determinado rango de probabilidad y su nivel de confianza*

nen una fiabilidad comparable a los pronósticos para los dos días siguientes que se emitían hace veinte años.

En España, el principal emisor de predicciones meteorológicas (de productos de predicción, en general) es AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). A lo largo de su historia el Servicio Meteorológico ha tenido que ir adaptándose a los cambios tecnológicos, cuyo

ritmo ha aumentado de forma vertiginosa en los últimos años. El primer ordenador que tuvieron en la Agencia, cuando era Instituto Nacional de Meteorología, fue un IBM 370 que estuvo operativo hasta 1983. Los programas se introducían con tarjetas perforadas y sus prestaciones no superaban a las de un portátil de andar por casa. Posteriormente, en 1984, se instaló un ordenador bastante más potente, un Fujitsu FACOM-M382, que en aquella época costó 800 millones de pesetas (unos 4,8 millones de euros). Estuvo operativo hasta mediados de los noventa, y en hora y media corría un modelo de área limitada de 100 kilómetros de rejilla y quince niveles de atmósfera. A aquel ordenador le siguieron dos superordenadores CRAY con unas capacidades mucho mayores, hasta llegar al «monstruo» actual, un CRAY X1E con una potencia de cálculo descomunal. Entre los planes a corto plazo de AEMET está el de ir sustituyendo este superordenador por otro aún más potente, ya que los modelos tienen cada vez una mayor resolución, lo que exige muchos más cálculos en el mismo tiempo. El objetivo es dar operatividad a un modelo de tan sólo 2 kilómetros de rejilla y 90 niveles en la vertical.

El modelo de área limitada de AEMET es el HIRLAM, y sus salidas gráficas están disponibles a través de la página web de la Agencia ([www.aemet.es](http://www.aemet.es)). La resolución espacial del HIRLAM es de 5 kilómetros, y todavía se quiere rebajar algo más. Estamos hablando ya de un nivel de detalle importante, aunque bajar de escala no es la panacea, ya que no se consigue obtener toda la información que no es capaz de proporcionarnos el modelo de escala global al que está anidado el referido LAM. Las parametrizaciones que se tienen en cuenta, fenómenos físicos que los modelos más grandes pasan por alto, no dejan de ser aproximaciones burdas de la realidad. Además, las condiciones de contorno de las zonas donde estos modelos establecen sus fronteras están fijadas por los modelos globales, por lo que al final el mayor o menor grado de acierto de-

pende en buena medida de la salida del modelo de circulación general.

En los modelos de circulación general, el tamaño de la cuadrícula es superior a la escala espacial de algunos fenómenos meteorológicos (tornados, tormentas locales...), por lo que esos modelos los pasan por alto. Tanto los referidos LAM, como los modelos de circulación general no hidrostáticos (capaces de representar mucho mejor el complejo fenómeno de la convección —responsable de las escurridizas tormentas—) nos ayudan a subsanar, en parte, ese problema.

Los superordenadores actuales son tan potentes, que no sólo hacen correr al modelo de turno en pocas horas, obteniendo campos meteorológicos de distintas variables para diferentes horizontes de predicción. Mediante la técnica de «Ensembles» (predicción por conjuntos) se corre el modelo hasta cincuenta veces, variando en cada caso ligeramente las condiciones iniciales, de manera que se obtienen diferentes soluciones que se agrupan en función de su probabilidad de ocurrencia. Surge de esta manera el concepto de predicción probabilística. Cada estado de tiempo futuro tiene asignada una determinada probabilidad y se diluye la idea del acierto/fallo en el pronóstico.

Todo ello permite generar de forma automática predicciones para decenas de miles de puntos (léase localidades) de todo el mundo, con un horizonte de predicción del orden de la decena de días, asignando a cada variable prevista (temperatura, precipitación, viento...) un determinado rango de probabilidad y su nivel de confianza. Estas predicciones abundan en Internet y están también muy extendidas entre las aplicaciones de los *smartphones* (móviles inteligentes).

Hemos aprendido a acotar la incertidumbre inherente a la evolución futura del tiempo atmosférico, lo que supone un importante hito en el conocimiento científico y un salto cualitativo con respecto a las salidas clásicas de los modelos.

Uno de los principales retos que tienen los hombres del tiempo encima de la mesa es hacer llegar de forma adecuada al público toda esa gran cantidad de información que comienzan a tener a su disposición. No es una tarea fácil, ya que integrar en su discurso, así como en los grafismos que utilizan, la terminología probabilística requiere de un tratamiento adecuado para no generar confusión entre el público. A pesar de la dificultad, la comunicación meteorológica debe caminar por esa nueva dirección. Los espacios del tiempo han de evolucionar y adaptarse a los nuevos tiempos. No será el final de los tradicionales mapas del tiempo, pero éstos sí que deberán incorporar de alguna manera la incertidumbre. El uso de distintos colores, similar al que se emplea en los avisos meteorológicos, parece la evolución más natural.

### EL FUTURO DE LA PREDICCIÓN METEOROLÓGICA

¿Cuál es el futuro de la predicción meteorológica? ¿Cómo evolucionará en los próximos años? ¿Llegaremos a disponer de predicciones certeras a más días vista? Todo hace pensar que la capacidad de cálculo de los ordenadores seguirá creciendo de forma imparable, por lo que las predicciones continuarán ganando en precisión. En los próximos años, lo más seguro es que la mayor mejora la comencemos a ver en la predicción a corto y muy corto plazo de fenómenos de micro y mesoescala.

Puesto que, presumiblemente, dispondremos de ordenadores cada vez más potentes, cabría pensar que, de la misma forma que la fiabilidad de una predicción actual para dentro de cinco días es similar a la que tenía una para pasado mañana hace veinte años, dentro de otro par de décadas alcanzaremos idéntica exactitud en los pronósticos a ocho-diez días, y para la segunda mitad de siglo podremos saber con bastante precisión cómo será el tiempo en una localidad dentro de quince o más

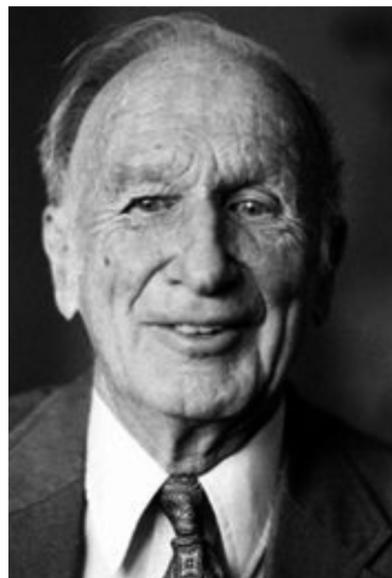


FIGURA 3.—Edward N. Lorenz (1917-2008).  
*El padre de la teoría del caos*

días. Sin embargo, esto nunca será posible. Nuestra capacidad predictiva tiene un límite que no está impuesto únicamente por la potencia de cálculo de los ordenadores, sino por el comportamiento caótico de la atmósfera. Hace cincuenta años ya se encargó de demostrarlo el meteorólogo y profesor del prestigioso Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), Edward N. Lorenz (1917-2008), al comprobar que la atmósfera es un sistema gobernado por las leyes del caos.

Somos incapaces de establecer con absoluta precisión el estado inicial de la atmósfera, y eso nos lleva a no poder predecir de forma fiable el tiempo más allá de una semana o diez días a lo sumo. En palabras del propio Lorenz: «*La dependencia sensible de las condiciones iniciales en sistemas dinámicos no lineales [como la atmósfera] es la responsable de la aparente aleatoriedad en los procesos observados*». Así las cosas, el principal reto de la predicción numérica no pasa por predecir el tiempo cada vez a más días vista, sino ganar precisión en los pronósticos a muy corto, corto y medio plazo, donde queda aún un amplio margen de mejora. ❖