

# Sobre los modelos de predicción meteorológica y climática

**Manuel de Castro**

*Instituto de Ciencias Ambientales. Universidad de Castilla-La Mancha*

## Introducción

El tiempo meteorológico y el clima son temas que suscitan tanta atención pública porque las condiciones atmosféricas influyen en una amplia variedad de actividades socio-económicas y afectan a la salud y el bienestar de las personas. Sin embargo, resulta curioso comprobar lo poco que se conoce sobre lo que hay detrás de las previsiones del tiempo y el clima. Eso, sin duda, facilita la proliferación de ideas erróneas que pueden provocar desconfianza o inducir falsas expectativas.

La primera sorpresa que recibe la mayoría de los que quieren informarse sobre estas técnicas es que *la previsión meteorológica o climática no se basa en la estadística*. Que no se precisa conocer lo que ocurrió en tiempos pasados para pronosticar el futuro. Que, como los procesos atmosféricos obedecen a leyes y principios de la Física, las previsiones se realizan resolviendo ecuaciones a partir del mejor conocimiento del estado del sistema al inicio de la predicción. Es decir, que se trata de modelos numéricos, no estadísticos. Que los sucesos del pasado solo se tienen en cuenta para examinar la calidad de las previsiones efectuadas entonces. En definitiva, que *la estadística se usa para evaluar los pronósticos, no para realizarlos*.



A continuación se presenta una breve semblanza de los fundamentos de los modelos que se emplean para las predicciones meteorológicas y las proyecciones de cambio climático, remitiendo al lector que desee una información más completa a textos especializados.

## Predicciones meteorológicas

La observación de cualquier secuencia de imágenes de satélite permite comprobar que el tiempo local está determinado por movimientos atmosféricos a escala planetaria. Por tanto, el pronóstico meteorológico debe basarse en determinar objetivamente la evolución futura de los complejos procesos atmosféricos a escala global.

Las predicciones meteorológicas se efectúan utilizando modelos globales de la atmósfera, con los que se simula la evolución temporal de las variables fundamentales que describen el estado de este sistema dinámico a partir de unas condiciones iniciales conocidas. Para ello hay que resolver un conjunto de ecuaciones que expresan leyes y principios de la Dinámica y la Termodinámica. Se trata de un complejo sistema de ecuaciones diferenciales cuyas incógnitas (variables a pronosticar) son el viento, la temperatura, la presión y la humedad del aire en cualquier punto de la atmósfera. Para su resolución tan sólo se necesitaría conocer el valor de dichas variables en toda la atmósfera en un instante inicial y el resultado obtenido sería su evolución futura. Pero existe un conjunto de limitaciones que hay que sortear:

1. La resolución de este complejísimo sistema de ecuaciones solo puede conseguirse recurriendo a esquemas numéricos aproximados. Para ello se divide el espacio ocupado por toda la atmósfera en una malla de celdillas tridimensionales con un tamaño determinado (20-50 km horizontal; 10-200 m vertical). Al iniciar la simulación, hay que asignar el valor de las variables atmosféricas en cada una de esas millones de celdillas usando los datos registrados simultáneamente en ese momento en la red mundial de observaciones atmosféricas. A partir de dicho instante inicial, se resuelven las ecuaciones en cada nodo para determinar cuánto va cambiando allí el valor de cada variable en intervalos regulares (pocos minutos). Y así se continúa iterativamente hasta completar el plazo de la predicción (generalmente 7-10 días). Una condición que imponen los

esquemas numéricos es que cuanto menor sea el tamaño de las celdillas, más cortos han de ser los intervalos de tiempo, necesitándose entonces un mayor número de iteraciones para completar la simulación; es decir, mucho más cálculo.

2. Al dividir la atmósfera en celdillas, los procesos físicos de tamaño comparable o menor no pueden ser resueltos por los esquemas numéricos. Pero es preciso considerar esos procesos pues muchos de ellos afectan decisivamente a la evolución del estado de la atmósfera, como la formación de nubes y precipitación, el calentamiento radiativo del aire y la superficie o los intercambios turbulentos de calor entre las diversas capas atmosféricas y el suelo, entre otros. Para tenerlos en cuenta, se ha de resolver paralelamente un enorme conjunto de ecuaciones de carácter semiempírico (parametrizaciones físicas) y deducir así el efecto de cada uno de ellos sobre las variables de pronóstico.
3. La atmósfera es un sistema cuya evolución depende muy críticamente de las condiciones iniciales (sistema caótico). Es decir, cualquier imperfección al asignar los valores iniciales de las variables en cualquier punto de la atmósfera se propaga en los cálculos posteriores, provocando que la predicción vaya divergiendo de la evolución meteorológica real a medida que aumenta el plazo del pronóstico, por lo que deja de tener utilidad más allá de unos pocos días.

Por tanto, la predicción meteorológica resulta ser un ejercicio para el que se precisan los más potentes superordenadores con los que resolver *aproximadamente* un complejo sistema de ecuaciones de leyes físicas exactas, en cuya solución se amplifican progresivamente las *imperfecciones* al asignar las condiciones iniciales. Esto llevaría a formular una pregunta clave: ¿con cuánta antelación se puede realizar una previsión fiable del tiempo?, aunque su respuesta tendría poco interés práctico, pues ese plazo depende del umbral de error que se establezca para considerar que una predicción es fiable o no, y también es función de la variable atmosférica que quiera predecirse. Por eso, quizá la pregunta más pertinente sería: ¿se puede determinar la *fiablez* de las previsiones meteorológicas en el momento de realizarlas?

La Historia de la Ciencia atribuye al meteorólogo Edward Lorenz la autoría de la revolución científica que en la década de los 70 el matemático James Yorke bautizó con el nombre de “caos”. Pero la acepción no científica de “ausencia de orden” que tiene ese término puede llevar a confusión, pues los sistemas caóticos, como la atmósfera, están regidos por ecuaciones precisas. Por ello, resulta más apropiado hablar de “sistemas dinámicos complejos que presentan una gran sensibilidad a las condiciones iniciales”, aunque resulte algo más largo. También se emplea el término “caos determinístico”, porque el grado de sensibilidad a las condiciones iniciales de un sistema dinámico complejo no siempre es igual, pero se puede predecir. Los estados ini-



ciales más “estables” son menos sensibles a los errores iniciales y, por tanto, su evolución podría simularse con *mayor fiablez*, es decir resultaría *más predecible*.

Para dictaminar el grado de *predecibilidad* con que es posible pronosticar la evolución de un estado atmosférico hay que realizar un conjunto de simulaciones con un modelo meteorológico global, cada una de las cuales se ejecuta partiendo de valores iniciales *ligeramente* diferentes. De todo este conjunto de predicciones, serán más probables aquellas que más se asemejen entre sí y menos probables las que más difieran. Esta es la base de la moderna predicción meteorológica por conjuntos (en inglés, *ensemble forecasting*). De forma que, actualmente, las predicciones meteorológicas se ofrecen en términos de probabilidad de ocurrencia de un evento determinado o de probabilidad de que el valor previsto de una variable atmosférica cualquiera en un determinado lugar esté comprendido en un cierto intervalo. Así, las predicciones se expresan mediante sentencias del tipo de “la temperatura máxima en Madrid dentro de 3 días estará comprendida entre 15,3 y 17,1 grados con una probabilidad del 90%”, o bien “la probabilidad de precipitación pasado mañana por la tarde en Munich es del 60%”.

## Proyecciones de cambio climático

Los modelos que se utilizan para realizar proyecciones del cambio climático que podría causar una progresiva acumulación de gases de efecto invernadero (GEIs) en la atmósfera son mucho más complejos que los aplicados a predicciones meteorológicas. Esto se debe a que han de simular multitud de procesos físicos que evolucionan mucho más lentamente que los que tienen lugar en la atmósfera, como son la mayoría de los que ocurren en los otros cuatro componentes del llamado *sistema climático*: océanos, criosfera (hielo y nieve), geosfera (suelos) y biosfera (vegetación). Por esta razón se ha convenido en denominarlos Modelos del Sistema Tierra (en inglés *Earth System Models*). Además de la dinámica atmosférica, estos modelos han de resolver también las ecuaciones de los

principios que rigen la dinámica oceánica y parametrizar los enormes intercambios de materia, calor y momento, así como las incesantes interacciones entre los componentes del sistema climático a causa de multitud de procesos físicos, químicos y biológicos. En suma, son modelos extremadamente complejos que precisan una gigantesca potencia computacional.

Uno de los procedimientos para evaluar la calidad de estos modelos consiste en simular con ellos la evolución de las condiciones climáticas durante un largo periodo temporal (generalmente los últimos 150 años), teniendo en cuenta la variación observada de la concentración atmosférica de GEIs y aerosoles, y comparar sus resultados con los registros climáticos disponibles en dicho periodo. Una vez comprobado que son capaces de reproducir aceptablemente la evolución del clima observado, se continúa la simulación hasta el final del presente siglo (o más allá), considerando distintas estimaciones plausibles sobre cómo podrían evolucionar las emisiones de GEIs y aerosoles por las actividades humanas en las próximas décadas.

Los escenarios de cambio climático se elaboran a fin de proporcionar la información necesaria para analizar los posibles impactos y evaluar estrategias de mitigación y adaptación. Deben ir siempre acompañados por una valoración objetiva de su *grado de incertidumbre* que, como antes se ha señalado, se puede deducir disponiendo de un conjunto de simulaciones realizadas con varios modelos. Así, en el último Informe de Evaluación del IPCC (*Panel Intergubernamental para el Cambio Climático*) se consideraron los resultados de un conjunto de más de 20 modelos climáticos globales, a partir de los cuales se asignan índices de confianza a las proyecciones de cambio de las principales variables climáticas en las diversas regiones del planeta.

Por último, conviene puntualizar que el clima de cualquier región se determina a partir de promedios de las condiciones meteorológicas diarias en periodos de decenas de años, y eso es exclusivamente lo que se pretende simular con los modelos de cambio climático. Dicho de otra forma, su objetivo no es reproducir fielmente la secuencia diaria ni mensual de las condiciones meteorológicas a lo largo de decenas de años o siglos. Ya se ha señalado que es imposible predecir la evolución real de situaciones meteorológicas más allá de un plazo de pocos días, y que esto se debe esencialmente a que la atmósfera es un sistema caótico. Con los modelos climáticos, al igual que con los de predicción meteorológica, se simula la secuencia temporal de condiciones atmosféricas en cualquier zona del globo terrestre, aunque a lo largo de decenas o centenares de años en este caso. No cabe esperar que dicha secuencia coincida día a día, mes a mes o año a año con la real, aunque no haya razones físicas que imposibiliten su ocurrencia. Lo que se pretende, y así se comprueba, es que las distribuciones estadísticas (promedios y variabilidad) de dicha secuencia de valores se correspondan aceptablemente con las del clima real observado en el periodo simulado. En ese caso, es razonable asumir que tales modelos serían también capaces de simular el clima futuro considerando diversas evoluciones posibles del

contenido de GEIs y aerosoles en la atmósfera. Y, finalmente, comparando las estadísticas de los valores simulados en un periodo de referencia del pasado reciente (*clima actual*) con las de un periodo futuro de igual extensión, se deducirían los escenarios de cambio climático que cabría esperar en dicha época. Es decir, estas predicciones son del tipo “*en el último tercio de este siglo las precipitaciones en primavera disminuirán entre un 20% y un 40% respecto a los valores climatológicos actuales en el sur de España con un 90% de probabilidad, si en las próximas décadas las emisiones globales de GEIs continuaran creciendo como hasta ahora*”. Por ello los resultados con este tipo de modelos se denominan “*proyecciones*” de cambio climático, pues dependen de cómo pudieran evolucionar tales emisiones antropogénicas.

“ **Los escenarios de cambio climático se elaboran a fin de proporcionar la información necesaria para analizar los posibles impactos y evaluar estrategias de mitigación y adaptación** ”

### Conclusión

La Física de la Atmósfera y del Clima se incluye entre las ramas de las ciencias experimentales que más avances ha conseguido en los últimos años. La disponibilidad de medios de observación de la Tierra cada vez más sofisticados, junto con el desarrollo de modelos más perfeccionados que el impresionante aumento de la potencia de computación permite ejecutar, han mejorado de forma muy ostensible la calidad y fiabilidad de las predicciones meteorológicas a corto y medio plazo. Por otra parte, se dispone también de modelos mucho más complejos capaces de simular aceptablemente la evolución del llamado *cambio climático antropogénico* a escala decadal y secular. Aunque existen incertidumbres, y en mayor o menor medida siempre las habrá, están ofreciendo una información valiosa para el diseño de estrategias de mitigación y adaptación ante esa formidable e inédita amenaza.