Introducción

1

DOI: 10.31978/014-18-009-X.01

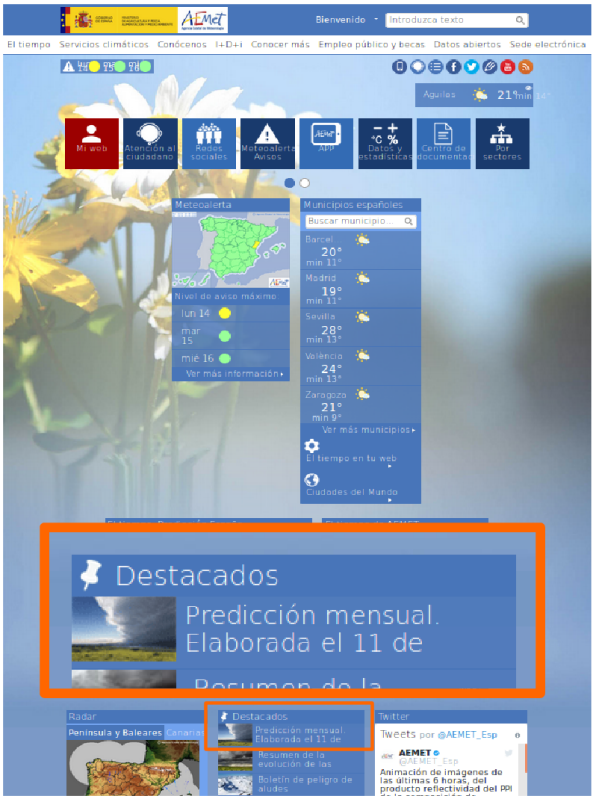
CARLOS SANTOS BURGUETE
Centro Nacional de Predicción (CNP), Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

> I think that it is a relatively good approximation to truth - which is much too complicated to allow anything but approximations - that mathematical ideas originate in empirics. But, once they are conceived, the subject begins to live a peculiar life of its own and is [...] governed by almost entirely aesthetical motivations. In other words, at a great distance from its empirical source, or after much "abstract" inbreeding, a mathematical subject is in danger of degeneration. Whenever this stage is reached the only remedy seems to me to be the rejuvenating return to the source: the reinjection of more or less directly empirical ideas.
>
> *"The Mathematician", en "The Works of the Mind" (1947) ed. R. B. Heywood* – JOHN VON NEUMANN

En esta introducción empezaremos a responder algunas de las preguntas planteadas en el prefacio, las preguntas que la sociedad plantea a los profesionales de la meteorología. ¿Hasta cuántos días son fiables las predicciones del tiempo? ¿En qué se basa la predicción por localidades? ¿Pueden hacerse predicciones con seis meses de antelación? ¿Cómo puede predecirse el cambio climático? ¿Se harán predicciones cada vez más exactas? ¿Se usa la teoría del caos en la predicción del tiempo? ¿Qué es el efecto mariposa? Ofrecemos, en el camino, una serie de enlaces a algunos de los contenidos del libro.

Palabras clave: meteorología, predicción meteorológica, modelos atmosféricos, limitaciones de los modelos, predecibilidad, sistemas de predicción por conjuntos, predicción probabilista.

Imagen parte superior: *cielo caótico* sobre la dehesa en el noroeste de Madrid, con varios tipos de *cumulus*, *stratocumulus*, así como nubes medias y nubes altas. Fotografía de JUAN CARLOS GARCÍA COLOMBO.



GOBIERNO DE ESPAÑA — MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

AEMet Agencia Estatal de Meteorología

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA

Predicción para las próximas tres semanas y análisis de la semana anterior
Elaborada el 14 de abril de 2017

Predicción para los próximos 10 días

El próximo fin de semana, sábado 15 y domingo 16, el país se encontrará bajo la influencia de un anticiclón centrado al noroeste de la Península. Estará nuboso o con intervalos nubosos en el extremo norte peninsular, con chubascos y tormentas en el Pirineos, y lluvias débiles durante la primera mitad del día el sábado en el Cantábrico. En el resto del país se espera que predominen los cielos poco nubosos, con nubosidad de tipo alto, algo de nubosidad de evolución diurna en la mitad norte peninsular, e intervalos de nubes bajas el domingo en el área del Estrecho y Melilla. Temperaturas en ascenso en Canarias y este de la Península, y en descenso en el noreste peninsular y Baleares, y viento con predominio de las componentes norte y este.

La próxima semana tiende a incrementarse gradualmente la inestabilidad en la Península. El lunes 17 predominarán los cielos poco nubosos inicialmente, con nubosidad de evolución diurna y posibilidad de algún chubasco en el interior de la mitad norte peninsular. El martes 18 y el miércoles 19 la posibilidad de precipitaciones se extenderá a casi todo el país, siendo más probables en la mitad norte peninsular. Temperaturas en descenso en Canarias y el miércoles en la Península y Baleares. Viento con predominio de la componente este en la Península, y la norte en Baleares y Canarias, con probables intervalos de intensidad fuerte en el Cantábrico, Ampurdán, Baleares, y Estrecho.

Durante el resto de la semana, existe una amplia incertidumbre sobre la situación atmosférica, no pudiéndose descartar las precipitaciones en ningún punto de España, siendo más probables en áreas de montaña de la mitad norte de la Península, y en el litoral mediterráneo.

Tendencia general para el periodo del 17 de abril al 7 de mayo

Se representan a continuación los mapas de anomalías respecto de la climatología de 20 años del modelo de predicción del Centro Europeo (VarEPS-Mensual), de los valores medios semanales de dos variables meteorológicas: la temperatura a 2 metros (T 2m) en °C y la Precipitación Total (PCP) en mm. Utilizando técnicas estadísticas se blanquean aquellas áreas donde la serie de valores previstos del VarEPS-Mensual no es significativamente diferente de la serie de los valores de la climatología del modelo.

Figura 1.1: Boletín de predicción mensual de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). A la izquierda, portada del sitio web `http://www.aemet.es` *y ubicación aproximada de la predicción mensual, descargable en formato PDF. A la derecha, aspecto del boletín mensual. AEMET.*

1.1 La predicción mensual

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) emite regularmente (todos los viernes en 2018), en el sitio web `http://www.aemet.es`, un boletín de predicción mensual (Figura 1.1, se replica después el texto en la Figura 1.2 en la página siguiente). Esta predicción va orientada al público general, no es específica para ámbitos profesionales como la aviación, la navegación o la agricultura; tampoco lo es para determinadas actividades de ocio como la montaña o la playa. Es una predicción general. Emitiéndose el viernes, abarca varios plazos importantes. En primer lugar, el epígrafe *Predicción para los próximos 10 días* engloba el fin de semana junto con la semana entrante. El primer párrafo corresponde al fin de semana, incluyendo el propio viernes. Es de importancia especial por ser, en general, espacio para el tiempo libre. Para los meteorólogos que preparan esta predicción, este fin de semana abarca el muy corto y el corto plazo, las primeras 48 horas. Después viene la semana entrante: desde el lunes hasta el domingo. Los primeros días de esa semana entrante conforman lo que en predicción llamamos el medio plazo y, en ocasiones, forman el segundo párrafo por sí mismos. Si los días siguientes son similares o pueden describirse en una pauta común a los primeros, entonces sólo hay un segundo párrafo. Si, por el contrario, esos días siguientes son, meteorológicamente hablando, bien diferenciados, entonces formarán un tercer párrafo. Sigue el epígrafe *Tendencia general para el periodo del 17 de abril al 7 de mayo*. Ahí se incluirá una previsión general para la semana referida anteriormente y para las dos siguientes, por lo que, estrictamente hablando, la predicción no abarca el mes completo. En lugar de emitir un pronóstico ordinario, se presentan unos *mapas de anomalías con respecto a la climatología* y se explican brevemente, añadiendo una nota a pie de página que reza así:

> **Nota**. Las tendencias mensuales se obtienen a partir de los productos del modelo de predicción mensual del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo. Estas predicciones están sujetas a incertidumbres que, por un lado, se incrementan al aumentar el plazo de predicción y, por otro, son más elevadas cuando se realiza una interpretación de los productos a escala regional, sobre zonas de tamaño relativamente reducido.

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA
Predicción para las próximas tres semanas y análisis de la semana anterior
Elaborada el 14 de abril de 2017

Predicción para los próximos 10 días

El próximo fin de semana, sábado 15 y domingo 16, el país se encontrará bajo la influencia de un anticiclón centrado al noroeste de la Península. Estará nuboso o con intervalos nubosos en el extremo norte peninsular, con chubascos y tormentas en Pirineos, y lluvias débiles durante la primera mitad del día el sábado en el Cantábrico. En el resto del país se espera que predominen los cielos poco nubosos, con nubosidad de tipo alto, algo de nubosidad de evolución diurna en la mitad norte peninsular, e intervalos de nubes bajas el domingo en el área del Estrecho y Melilla. Temperaturas en ascenso en Canarias y este de la Península, y en descenso en el noreste peninsular y Baleares, y viento con predominio de las componentes norte y este.

La próxima semana tiende a incrementarse gradualmente la inestabilidad en la Península. El lunes 17 predominarán los cielos poco nubosos inicialmente, con nubosidad de evolución diurna y **posibilidad** de algún chubasco en el interior de la mitad norte peninsular. El martes 18 y el miércoles 19 la **posibilidad** de precipitaciones se extenderá a casi todo el país, **siendo más probables** en la mitad norte peninsular. Temperaturas en descenso en Canarias y el miércoles en la Península y Baleares. Viento con predominio de la componente este en la Península, y la norte en Baleares y Canarias, con **probables** intervalos de intensidad fuerte en el Cantábrico, Ampurdán, Baleares, y Estrecho. Durante el resto de la semana, **existe una amplia incertidumbre sobre la situación atmosférica**, no pudiéndose descartar las precipitaciones en ningún punto de España, **siendo más probables** en áreas de montaña de la mitad norte de la Península, y en el litoral mediterráneo.

[...]

Figura 1.2: Extracto del texto del boletín de predicción mensual de la Figura 1.1 en la página anterior. En negrita están marcados aquellos términos que introducen probabilidad.

En la Figura 1.2 replicamos una buena parte del contenido del boletín, marcando en negrita aquellos términos que, por introducir información probabilista, resultan de especial interés.

Encontramos una serie de aspectos destacables, tanto en el contenido como en la forma, del boletín mensual, aspectos que nos van a servir como punto de partida para introducir algunas de las ideas importantes de este libro:

Detalle. Cuanto más cerca en el tiempo (lo que llamamos alcance predictivo), más cantidad de información detallada se aporta. Así mismo, la información es de carácter más determinista, no suele implicar probabilidades. Por ejemplo, *estará nuboso*.

Incertidumbre. Según nos alejamos en el tiempo, es decir, según avanzamos en el plazo o alcance predictivo, normalmente va creciendo la incertidumbre en la predicción. En ocasiones, esta incertidumbre se expresa explícitamente, e. g. *existe una amplia incertidumbre sobre la situación atmosférica.*

Probabilidad. A la par que aumenta la incertidumbre, los términos que implican probabilidades van apareciendo de forma natural. Por ejemplo, *siendo más probables en la mitad norte peninsular*.

Estos aspectos parecen naturales: la atmósfera, como la naturaleza en general, es más predecible en plazos cortos que en largos. Pero, además, parece que los meteorólogos tienen bastante claro cuándo hablar con probabilidades o cuándo estar más seguros. En la actualidad (2018), los predictores del tiempo disponemos de potentes herramientas que nos permiten predecir fenómenos meteorológicos en la atmósfera con bastante *precisión* y *exactitud* pero, sobre todo, podemos disponer de herramientas que nos permiten evaluar las probabilidades de esos fenómenos, la incertidumbre asociada a ellos, el riesgo potencial de que sean adversos, etcétera. Esas herramientas que evalúan la, así denominada, *predecibilidad* [3, 11] atmosférica, que está muy relacionada con la incertidumbre y la probabilidad, están basadas en investigaciones sobre la física del caos, en particular sobre el carácter caótico de la atmósfera como sistema dinámico [1, 9]. Veamos todos estos aspectos poco a poco.

1.2 Meteorología y predicción

En este ámbito de la predicción del tiempo, la sociedad exige a los servicios meteorológicos predicciones cada vez más *precisas*: son cada vez más populares las predicciones por localidades, disponibles en muchos portales de internet y ya se asume como normal que se pueda pedir una predicción concreta para un pueblo, una montaña o una playa. Se esperan, así mismo, predicciones muy precisas en el tiempo: quiero saber a qué hora lloverá mañana. Los llamados *fenómenos meteorológicos adversos*, presentes en nuestro país en forma de precipitaciones intensas, temporales, olas de frío o calor y otros, tienen un fuerte impacto tanto social como económico. Las autoridades encargadas de la protección civil quieren predicciones *exactas* de estos fenómenos, para poder optimizar sus actuaciones, intentando atender a la sociedad de forma rápida y eficiente, minimizando los recursos. Se barajan, pues, dos conceptos físicos diferentes que son por un lado, *precisión* que, en términos de predicciones quiere decir concretar mucho en el espacio y en el tiempo y, por otro lado, *exactitud*, que quiere decir que la predicción acierte razonablemente.

Pero, ¿pueden realmente hacerse predicciones cada vez más *precisas* y a la vez *exactas*? Hace unas décadas, el meteorólogo EDWARD N. LORENZ comenzó a dar una respuesta científica a esta pregunta, conectando la meteorología y la física del caos [7, 10]. La respuesta es *No, en general, no*. ¿Por qué? Si se quiere una respuesta breve y concisa, diremos que *porque la atmósfera es caótica*. Si queremos ir más allá, entonces podemos encontrar en este libro un abanico de respuestas que, como poco, nos ayudarán a entender mejor la pregunta. Profundizaremos en muchos sentidos, pero de momento diremos, buscando una respuesta más detallada, pero relativamente corta y apta para esta introducción, que no se pueden hacer predicciones cada vez más precisas y exactas, porque entendemos la atmósfera como un sistema dinámico *altamente no lineal* (cap. 5 en la página 49). Físicamente esto significa que el conjunto de ecuaciones con las que la describimos y simulamos por ordenador es *hipersensible* tanto a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales como a la formulación del modelo de simulación. Esta respuesta no cierra la posibilidad de *mejorar las predicciones*, sino que conduce a nuevas líneas de investigación, planteándonos en qué sentido puede ser una predicción mejor, dado que no puede ser mucho más *exacta* ni mucho más *precisa*. Teniendo en cuenta la citada naturaleza caótica de la atmósfera, debemos admitir que no es predecible con total precisión y exactitud, pero sí sabemos que, según la situación, la *inexactitud* o *incertidumbre* puede ser mayor o menor, y así su *predecibilidad* (cap. 12 en la página 155) menor o mayor, respectivamente. Las investigaciones actuales apuntan a estimar esa incertidumbre o lo contrario, la predecibilidad, mediante probabilidades.

1.3 Modelos atmosféricos y sus limitaciones

Los modelos atmosféricos (cap. 10 en la página 129) y, en general, los denominados modelos del Sistema Tierra, son modelos matemáticos para predecir el estado futuro de la atmósfera partiendo del estado actual, que se estima por medio de las observaciones atmosféricas y un proceso denominado asimilación de datos. Las ecuaciones que describen los procesos atmosféricos son ecuaciones diferenciales no lineales y, por tanto, no tienen solución analítica (digamos que no pueden solucionarse con exactitud) y han de ser aproximadas mediante simulaciones de ordenador (*métodos numéricos*). Así, las simulaciones numéricas se han convertido en una herramienta fundamental que acompaña a la teoría y a la experimentación, podríamos decir las tres patas de la ciencia. Para que las predicciones que nos brindan estos modelos sean útiles, es necesario que estén disponibles poco tiempo después de haber recibido las observaciones, por lo que se requieren grandes sistemas de computación. Así, el desarrollo de los modelos va muy ligado a los avances tecnológicos, especialmente en sistemas de observación punteros como los satélites (cap. 7 en la página 83) y en *supercomputación* (cap. 11 en la página 145). En 1950 se realizó la primera predicción numérica del tiempo por el equipo de CHARNEY [2]. En las últimas décadas los modelos numéricos han mejorado enormemente, por ejemplo el modelo del European Centre for Medium-range Weather Forecasts -Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio- (ECMWF) (cap. 19 en la página 289) ha conseguido mejorar algo más de un día por década el alcance predictivo en el que las predicciones pueden considerarse útiles [4, 5]. Se han convertido en ingredientes básicos en la predicción operativa (cap. 4 en la página 29). No obstante, los modelos no son perfectos, como veremos ahora y como se muestra detalladamente en otros capítulos de este volumen (cap. 15 en la página 207).

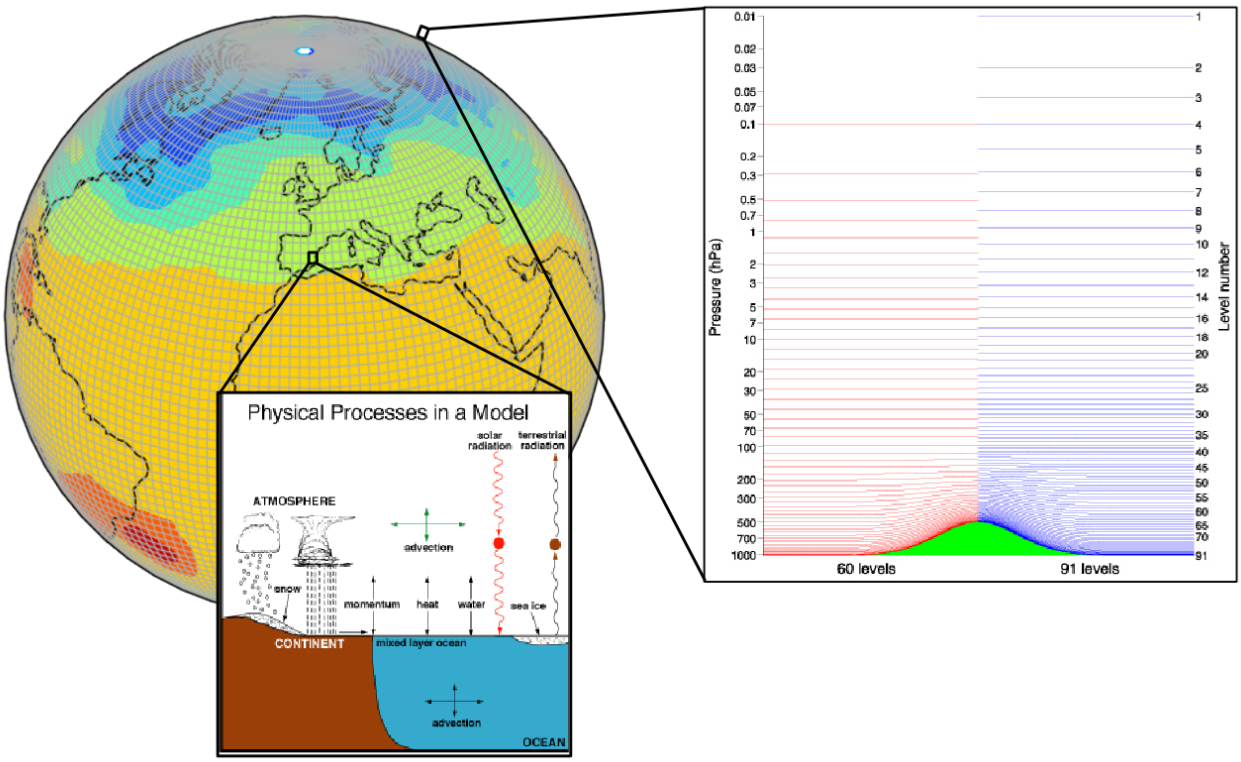


Figura 1.3: Modelos atmósfera-océano. Arriba a la izquierda: esquema figurado de la discretización del planeta en una malla horizontal con celdas de $2^o \times 2^o$ (creación propia con datos de temperatura de la NOAA). Abajo a la izquierda, procesos atmosféricos y oceánicos considerados en una celda que contendría el este de la península ibérica (NOAA https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/modeling_schematic.html). Derecha: ejemplo de división en niveles verticales de una celda, tanto niveles isobáricos, en rojo, como niveles híbridos, en azul (ECMWF, en la actualidad el número de niveles de su modelo es 137).

Modelos atmosféricos. Resuelven las ecuaciones dinámicas con que describimos la atmósfera discretizando el espacio y el tiempo. Por un lado (espacio), se divide la atmósfera en pequeñas partes, por ejemplo, trazando una malla imaginaria 3D que cubre el planeta, con un cierto tamaño de celdilla, tanto en la horizontal como en la vertical. En cada celda (o punto de malla) se simplifica la atmósfera describiéndola con un sólo valor para cada una de las variables atmosféricas utilizadas, e. g. en un caso muy sencillo presión, temperatura, humedad y dos componentes del viento. Todos los procesos atmosféricos que tienen lugar dentro de esa celda quedan reducidos a cinco números. Por otro lado (tiempo), se divide el tiempo en intervalos muy cortos, como las celdas en el espacio, y en cada intervalo se resuelven esas ecuaciones representando las variables atmosféricas. Esta discretización convierte las *ecuaciones diferenciales* en *ecuaciones en diferencias finitas*.

Las primeras trabajan en espacio y tiempo continuos y las segundas en las versiones discretas, finitas, lo que permite resolverlas numéricamente mediante ordenador y, por tanto es una de las claves de la modelización. No todos los procesos meteorológicos pueden resolverse con esta discretización. Sólo aquellos fenómenos cuya estructura tenga mayor tamaño que las celdas de la malla y, de una forma relacionada, su duración en el tiempo sea también superior a los intervalos discretizados, serán resueltos por el modelo. Esa primera familia de fenómenos se denomina dinámica (sec. 10.4 en la página 135). Los fenómenos de tamaño inferior a la celda, e. g. fenómenos radiativos, intercambios de calor, condensación, etc., deben resolverse aparte, mediante otros métodos. Esa segunda familia de fenómenos se denomina parametrizaciones físicas o física (sec. 10.5 en la página 137). Así pues, en la jerga de la modelización, tenemos la dinámica del modelo y las parametrizaciones físicas.

Figura 1.4: ¿Son perfectos los modelos? ¿Son los modelos buenas representaciones de la realidad? https://pixabay.com/en/venus-de-milo-the-statue-sculpture-3130119/

Hasta los años 90, para diseñar los modelos se estuvo asumiendo un comportamiento determinista de la atmósfera, lo cual es una simplificación. ¿Qué quiere decir *determinista* en este contexto? Quiere decir que, dado un estado inicial de la atmósfera, su evolución puede ser prevista numéricamente para dar un único estado final o predicción. En esa línea, el enfoque de todos los esfuerzos estaba en producir predicciones lo más *exactas* posible. Pero se fue constatando que, por mucho que mejorasen, los modelos deterministas seguían fallando en algunas situaciones. Esta pauta nos sigue sucediendo a día de hoy. Por tanto, se requiere la interpretación, por parte de predictores entrenados en sus características y limitaciones (cap. 27 en la página 401), así como técnicas estadísticas (cap. 14 en la página 193) y sistemas de predicción propiamente probabilistas que denominaremos sistema(s) de predicción por conjuntos (SPC) (cap. 13 en la página 165).

1.4 Limitaciones de los modelos y nuevo paradigma

¿Son perfectos los modelos? Los modelos son, de un modo u otro, representaciones de la realidad (Figura 1.4). Sí, pero, ¿son perfectos? Cualquier persona dedicada profesionalmente a la predicción del tiempo dirá que no. Esas personas usan modelos atmosféricos para realizar su trabajo y saben la respuesta por experiencia. Quizá una pregunta más refinada sea *¿son los modelos buenas representaciones de la realidad?* Eso nos hará pensar un poco más: defina usted *buenas*. Científica y técnicamente hablando, los modelos no son perfectos. Como ya se ha dicho, el meteorólogo EDWARD NORTON LORENZ demostró ya en 1963 que pequeños errores en las condiciones iniciales del modelo pueden crecer indefinidamente en la predicción [6, 7, 8]. Así mismo, hay que añadir los errores en las parametrizaciones físicas y en la dinámica, i. e. en la formulación del modelo.

La clave del problema está en aceptar esos errores y esas incertidumbres y, también, cómo representarlos adecuadamente: es necesario realizar un muestreo de esas incertidumbres, explorando apropiadamente el llamado *espacio de fases* de la atmósfera, el conjunto de posibles estados atmosféricos (sec. 5.1.4 en la página 53).

De modo que así surgió un nuevo *paradigma*, que incluye información cuantitativa sobre los errores, es decir, sobre la incertidumbre, en el proceso predictivo. Este nuevo paradigma introduce la probabilidad de forma natural en el sistema. Para dar cuenta de la incertidumbre en las condiciones iniciales de la atmósfera y en el propio modelo, se generan múltiples condiciones iniciales, ligeramente diferentes todas ellas pero compatibles con las observaciones, todas con la misma probabilidad de ser las correctas (*equiprobables*), y se integra el modelo en el ordenador para cada una de ellas. Estos fueron los albores de los así llamados SPC (cap. 13 en la página 165). Con estos sistemas podemos estimar la evolución temporal de la probabilidad de diferentes escenarios (para ser precisos, una distribución de probabilidad o PDF por sus siglas en inglés) mediante un conjunto o *ensemble* de estados atmosféricos posibles, todos ellos igualmente plausibles. La dispersión de este conjunto representará el error o incertidumbre en la predicción, de manera explícita, cuantitativa y detallada. En la actualidad (2018), los SPC se generan sistemáticamente en gran número de centros meteorológicos operativos (parte. IV en la página 288) y se utilizan como herramienta esencial en la predicción operativa (cap. 4 en la página 29) en lo que se denomina predicción probabilista (cap. 27 en la página 401).

1.5 Predicción probabilista

La probabilidad va incorporada de forma natural en estos SPC, de modo que los mapas y productos que podemos usar los predictores a partir de estos sistemas reflejan esa naturaleza probabilista. El uso adecuado de estas herramientas requiere formación específica y una cierta familiaridad con los conceptos y el lenguaje de la probabilidad. La implantación de este estilo de trabajo no es inmediata [12, 13].

En cualquier caso, en el ámbito profesional de la predicción meteorológica, la predicción probabilista empezó a implantarse en los años 90 y, a día de hoy, la predecibilidad y la probabilidad son ingredientes esenciales en los sistemas y centros de predicción. Ilustraremos las técnicas probabilistas de predicción abordando algunos casos de estudio concretos (parte VII en la página 654), algunos de ellos famosos casos de fenómenos extremos o adversos (sec. 12.5 en la página 161).

Asimismo, incluir términos de probabilidad en las predicciones que se ofrecen al público general se convierte en un auténtico reto para los medios de comunicación (cap. 40 en la página 615). El ser humano entiende y asimila las probabilidades con una serie de sesgos y pautas a tener en cuenta (sec. 40.1 en la página 616). Con la idea de mostrar cómo el lenguaje probabilista va introduciéndose poco a poco, hasta que algún día se considere algo normal, mostramos otros ejemplos en las Figuras 1.5, 1.6 en la página siguiente y 1.7 en la página 11. Invitamos a los lectores a explorar el formato y contenido de estos boletines de predicción, encontrar lenguaje probabilista y asociarlo a los aspectos que comentábamos anteriormente. Y no hace falta detenerse aquí: puede entrarse en el sitio web de AEMET, descargar la predicción mensual y explorarla del mismo modo.

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA
Predicción para el puente de mayo
Elaborada el 24 de abril de 2017

Viernes 28 y sábado 29: El tiempo de estos días estará determinado por el muy probable acercamiento de una pequeña borrasca al suroeste peninsular. La incertidumbre de estos días está asociada a la posición exacta de la baja pues unos escenarios la acercan más que otros. En todo caso, consideramos muy probable su presencia en el entorno del sur de Portugal. Esta baja inducirá un flujo de aire de componente sur, cálido, húmedo e inestable, que progresivamente reemplazará al aire frío y seco instalado en la Península y Baleares durante los días anteriores. Como consecuencia, el viernes comenzarán a producirse chubascos y tormentas, posiblemente fuertes, en el suroeste peninsular y que el sábado se extenderán a buena parte de la fachada atlántica y, con menor probabilidad, al resto del área peninsular. Otra consecuencia será el ascenso notable de las temperaturas, excepto las mínimas del viernes que incluso aún bajarán más, con numerosas heladas en zonas altas de la mitad norte peninsular y en la meseta norte. Las islas Canarias se verán afectadas por el paso de un frente frío poco activo que producirá precipitaciones más probables en las islas occidentales. El viento de componente oeste no será fuerte y originará un ligero descenso de las temperaturas.

Domingo 30: Es probable que otra borrasca, más profunda y con un frente frío asociado recorra la Península de oeste a este. Este escenario principal tiene aproximadamente un 70 % de probabilidad y daría lugar a lluvias generalizadas en las vertientes atlántica y cantábrica, menos probables en la mediterránea. Otras opciones minoritarias muestran la borrasca más lejos, con un frente menos activo o también una continuación del tiempo inestable de los días anteriores. El viento de componente oeste originará pocos cambios en las temperaturas, salvo en el área Mediterránea, donde subirán claramente. En Canarias se prevé un flujo de componente norte que producirá nubosidad abundante y posibles lluvias débiles en el norte del archipiélago. Las temperaturas continuarán descendiendo.

Lunes 1 y martes 2: La tendencia para estos días es de una gradual disminución de la inestabilidad. Es lo que indica el 60- 80 % de las opciones, lo que significaría la desaparición de la nubosidad y de las precipitaciones y una subida de las temperaturas diurnas. Sin embargo, el lunes con un 40 % y el martes con un 20 % de probabilidad, se puede mantener la situación de inestabilidad del domingo. En Canarias es muy probable que se establezca una situación de alisios flojos.

Figura 1.5: Predicción especial para el puente de mayo de 2017. AEMET.

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA
Predicción para las próximas tres semanas
Información elaborada el 26 de enero de 2018

Predicción para los próximos 10 días

El próximo sábado 27 estará muy nuboso con precipitaciones en el Cantábrico y Pirineos, con nevadas en área de montaña, tendiendo a remitir a lo largo del día. En la mitad oriental de la Península y Baleares, se incrementará la nubosidad hasta quedar muy nuboso, con lluvias en Baleares y en el litoral este peninsular. En el resto del país se mantendrá poco nuboso o con intervalos nubosos, con posibles lluvias en el norte de las islas Canarias occidentales. Las temperaturas no experimentarán cambios significativos. El viento soplará del norte, fuerte o con intervalos de fuerte en el noreste de Gerona, Baleares, y Canarias.

A partir del domingo 28 y hasta el miércoles 31, se incrementará la inestabilidad en el este y sureste de la Península, Ceuta, Melilla y Canarias. El domingo 28, las precipitaciones en el área de levante podrían ser fuertes o muy fuertes; y localmente persistentes en el entorno del cabo de la Nao. Serán en forma de nieve en el interior del sureste peninsular, estando la cota de nieve inicialmente en 800-1000 m subiendo durante el día a 1200-1400 m.

A partir del lunes 29 las precipitaciones localmente fuertes tendrán lugar en el área del Estrecho y en Canarias. Predominarán los vientos de componente este en la Península y Baleares, y norte en Canarias, siendo fuertes o con intervalos de fuerte en áreas de la mitad oriental de la Península, el litoral de Alborán, Canarias, y al principio en Baleares. Se producirá un aumento progresivo de las temperaturas en la Península. El resto de la semana se esperan precipitaciones en el extremo norte peninsular y Canarias, siendo probables también en el área mediterránea. Las temperaturas descenderán en el norte de la Península el jueves, tendiendo a recuperarse posteriormente.

[...]

Figura 1.6: Extracto del texto del boletín de predicción mensual elaborado el 26 de enero de 2018. AEMET.

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA
Predicción para la Semana Santa
Elaborada el 22 de marzo de 2018

Predicción para los próximos 10 días

Viernes 23 y sábado 24: Una pequeña baja situada hoy, jueves, en el centro del Atlántico Norte se profundizará de forma rápida y muy intensa (ciclogénesis explosiva) dando lugar a una borrasca muy profunda, denominada "Hugo". El viernes por la tarde se situará al norte de Galicia, entre los paralelos 45 y 50 ºN, y avanzará rápidamente hacia el golfo de Vizcaya. Esta nueva borrasca dará lugar a un temporal de viento en buena parte del área peninsular, mal estado de la mar y, de forma menos intensa, a precipitaciones generalizadas. Un frente frío activo, asociado a "Hugo", dará lugar a precipitaciones generalizadas que comenzarán la tarde del viernes en Galicia y se extenderán rápidamente al resto de la Península y también a Baleares. Tendrán lugar principalmente durante las horas nocturnas y, en general, no serán intensas. Lo más significativo serán las precipitaciones en forma de nieve en el noroeste peninsular, a partir de unos 800 m, que probablemente acumularán espesores de 20 cm en la cordillera Cantábrica occidental y central y 5 cm en el sistema Central. El viento fuerte o muy fuerte, del oeste y noroeste, comenzará también el viernes por la tarde en Galicia y Asturias y se trasladará a buena parte de la Península durante el sábado. Producirá rachas muy fuertes bastante generalizadas de 70-80 km/h, menos probables en el suroeste y noreste peninsular. En el interior del este y sureste peninsular las rachas probablemente superarán los 90 km/h. Las más fuertes se esperan en el norte de Galicia y en los litorales y zonas altas del área Cantábrica, con valores de 100-110 km/h, pudiendo localmente alcanzar los 120 km/h. En Canarias dominará la estabilidad atmosférica con alisios en general flojos.

Domingo 25: Se prevé un tiempo en general inestable, con probabilidad alta de precipitaciones en el norte y sur peninsular y en Baleares; y baja en el resto del área peninsular y en Canarias. En el norte la cota de nieve sube a 1000-1200 m y serán más importantes en Pirineos. Se espera viento fuerte de componente norte en Baleares en la primera mitad del día y del nordeste con intervalos de fuerte en Canarias.

Lunes 26 y martes 27: El acercamiento del anticiclón de Azores por el oeste peninsular dará lugar a una estabilización de la atmósfera que se reflejará en una disminución de la nubosidad y cese de las precipitaciones en buena parte del país, excepto en el extremo norte peninsular, donde es probable que rocen algunos frentes atlánticos con probabilidad de precipitaciones débiles. Las temperaturas subirán de manera notable en la mayor parte de zonas. Predominará el viento flojo de componente oeste, salvo en el área mediterránea, Galicia y Cantábrico donde podría haber intervalos de fuerte. En Canarias se prevé una situación de alisios con posibilidad de precipitaciones débiles en el norte.

Miércoles 28 a sábado 31: Aunque para estos días aumenta la incertidumbre de manera considerable, el escenario más probable marca una tendencia hacia una inestabilización progresiva, con un aumento de la probabilidad de precipitaciones, comenzando el miércoles y jueves por el norte y noroeste peninsular; y extendiéndose posteriormente al resto del país. La tendencia de las temperaturas es a ir bajando de forma progresiva en la mayor parte de zonas.

Figura 1.7: Predicción especial para Semana Santa de 2018. AEMET.

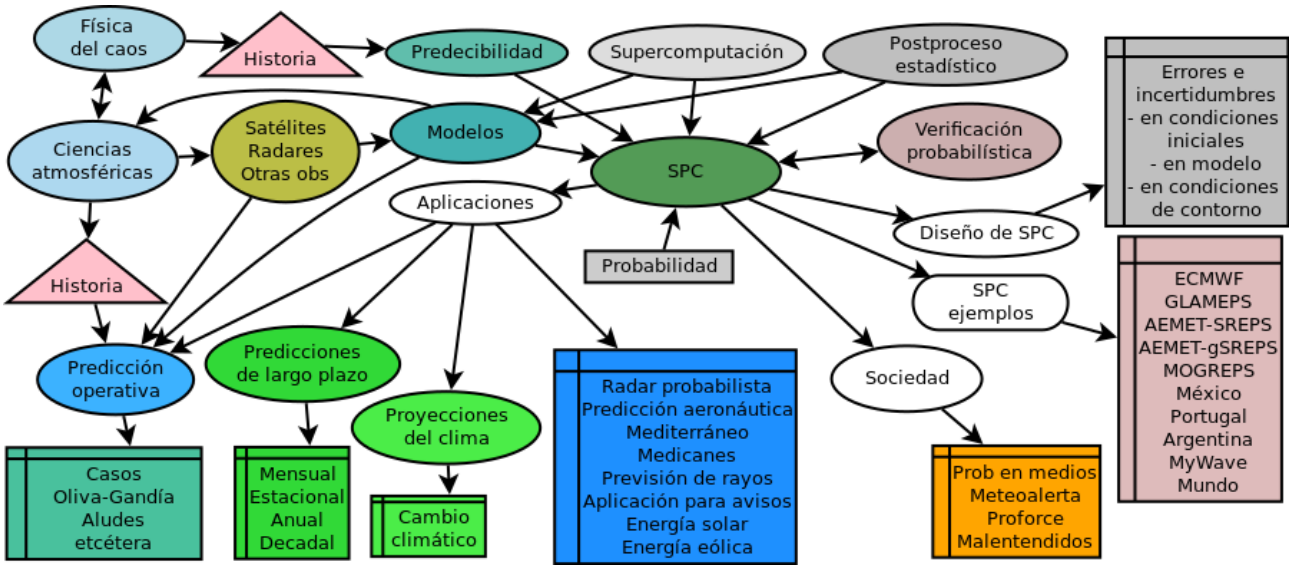


Figura 1.8: Mapa del libro.

1.6 Estructura del libro

Como anticipábamos en el prefacio, la Figura 1.8 ofrece un mapa del libro para facilitar su lectura según los diversos tipos de interés en el mismo. Los rectángulos, elipses o triángulos pueden ser capítulos o partes enteras. Aunque el nivel técnico o científico de cada capítulo es algo relativo o incluso subjetivo, hemos intentado orientar al lector con colores: gamas de grises corresponden a capítulos muy descriptivos, muy técnicos o de dificultad considerable. Otras gamas de colores están relacionadas con diferentes aspectos de interés y, aunque puedan incluir alguna dificultad, esperamos que ésta sea puntual.

1.7 Referencias

[1] ASHWIN, Peter, BUESCU, Jorge y STEWART, Ian. "From attractor to chaotic saddle: a tale of transverse instability". En: *Nonlinearity* 9.3 (1996), página 703 (citado en página 5).

[2] CHARNEY, Jules G, FJÖRTOFT, Ragnar y NEUMANN, J von. "Numerical integration of the barotropic vorticity equation". En: *Tellus* 2.4 (1950), páginas 237-254. DOI: 10.3402/tellusa.v2i4.8607 (citado en página 6).

[3] GARCÍA-MOYA, José Antonio y col. "Predictability of short-range forecasting: A multimodel approach". En: *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 63.3 (mayo de 2011), páginas 550-563. ISSN: 02806495. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00506.x (citado en página 5).

[4] HAIDEN, T y col. *Evaluation of ECMWF forecasts, including 2014-2015 upgrades*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2015. URL: https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2015/15275-evaluation-ecmwf-forecasts-including-2014-2015-upgrades.pdf (citado en página 6).

[5] HAIDEN, T y col. *Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2016 resolution upgrade*. European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 2016 (citado en página 6).

[6] LORENZ, E N. "Climatic predictability". En: *The physical basis of climate and climate modelling* (1975), páginas 132-136 (citado en página 8).

[7] LORENZ, Edward N. "Deterministic Nonperiodic Flow". En: *Journal of the Atmospheric Sciences* 20.2 (mar. de 1963), páginas 130-141. ISSN: 0022-4928. DOI: 10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2 (citado en páginas 6, 8).

[8] LORENZ, Edward N. "The predictability of a flow which possesses many scales of motion". En: *Tellus* 21.3 (jun. de 1969), páginas 289-307. ISSN: 00402826. DOI: 10.3402/tellusa.v21i3.10086 (citado en página 8).

[9] LORENZ, Edward N. *The essence of chaos*. University of Washington Press, 1995 (citado en página 5).

[10] LORENZ, Edward N. "Predictability: A problem partly solved". En: *Proc. Seminar on predictability*. Volumen 1. 1. 1996 (citado en página 6).

[11] PALMER, Tim N. y HAGEDORN, Renate. *Predictability of weather and climate*. Cambridge University Press, 2006 (citado en página 5).

[12] PERSSON, Anders. "User guide to ECMWF forecast products". En: *Ecmwf* March (2011), página 127 (citado en página 9).

[13] PERSSON, Anders. "Los Meteorólogos no podemos escapar de las probabilidades". En: *Tiempo y Clima* 5.44 (2014), páginas 32-37 (citado en página 9).