

## **Tiempo y clima: desentrañando los secretos de la atmósfera terrestre.**

Hablamos del “tiempo que hace” a diario con los familiares, con los amigos, con los vecinos. En ocasiones, equiparamos, erróneamente, condiciones “atmosféricas” puntuales con rasgos climáticos de un lugar y hablamos de “climatología adversa” que ha impedido el desarrollo de un evento deportivo, de una celebración, de un desfile. Viajamos a países con climas “exóticos” tan distintos a los que estamos acostumbrados en nuestra ciudad de residencia. Nos asombramos con el poder destructor de un huracán, de una borrasca “explosiva”, de una lluvia torrencial. Y valoramos positivamente el hecho de poder disfrutar de “buen tiempo”, con sol, calor y sin lluvias, en nuestro descanso estival.

Tiempo y clima se han convertido en elementos básicos de nuestro comportamiento diario, que condiciona nuestra actividad, nuestro ocio. Y llegamos a “exigir” una temperie a nuestra medida, a nuestra conveniencia...Y provocamos, con enorme irresponsabilidad, cambios en el clima que ha permitido la vida en la superficie terrestre. Y las disciplinas científicas que se encargan de su estudio –meteorología y climatología- tienen un pasado, un presente y un futuro, apasionantes; una historia llena de avatares que hoy nos permiten hacer pronósticos a unas horas o a una centuria.

### **¿Qué es el tiempo? ¿Qué es el clima?**

De entrada, es importante que los conceptos “tiempo” y “clima” no son sinónimos, ni definen el mismo fenómeno. Tiempo es el estado de la atmósfera en un momento del día. Es cambiante, coyuntural. Y precisamente ahí, reside su “magia”, en su diversidad diaria. No hay un día con un tiempo igual a otro; puede ser semejante, pero nunca será igual. Siempre cambiará el valor de algún elemento atmosférico (medio grado de temperatura, un minuto menos de luz, un milímetro más de lluvia, etc.). El castellano tiene un vocablo precioso para referirse al tiempo atmosférico diario, la temperie. Por contra, el clima forma parte de la “estructura” de un territorio, es el ambiente permanente que se da en un espacio geográfico y que viene definido por los valores medios de los elementos atmosféricos básicos (temperatura, precipitación, viento, etc.), obtenidos durante un amplio período de tiempo; al menos, deben manejarse datos estadísticos de tres decenios para poder validar la pertenencia de un territorio a una variedad u otra de clima. El castellano clásico tiene un término precioso para referirse a las condiciones climáticas de un lugar, el temple. El climatólogo francés Pédelaborde, nos ofreció a mediados del pasado siglo, la

definición seguramente más completa y sencilla de concepto clima, al concebirlo con el conjunto de fenómenos atmosféricos “percibidos y vividos” por el ser humano a lo largo de su vida.

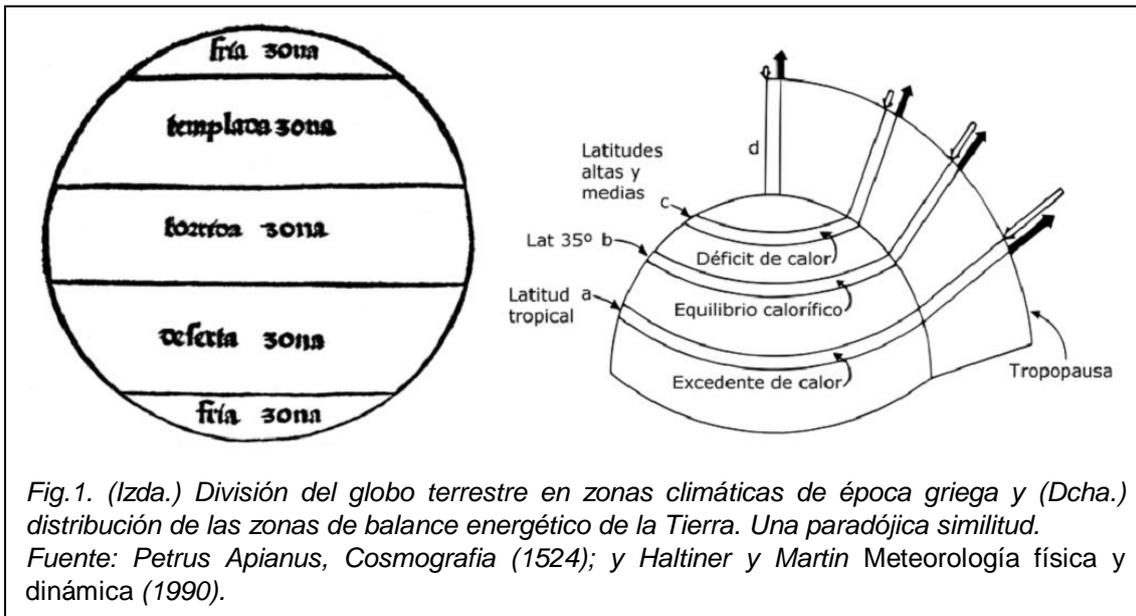
### **Una ciencia, con pasado milenario, y evolución acelerada en apenas dos siglos.**

En dos siglos, los dos últimos, se han desentrañado los secretos de nuestra atmósfera. Bueno, decir esto puede ser algo pretencioso, porque todo avance científico tiene antecedentes donde asentarse y evolucionar, y en el caso de la meteorología esto arranca en época griega. Es entonces cuando se escribe el primer tratado de meteorología (s. V a.C.) en el que su autor, Aristóteles, intenta dar respuesta a los fenómenos atmosféricos conocidos entonces por el ser humano y también los no atmosféricos como el funcionamiento de los volcanes o de los terremotos, que eran considerados fenómenos originados por los “meteoros” (μετεωρος, lo que está en el aire). En el escrito de Aristóteles se contienen teorías y explicaciones que, en buena medida, han permanecido hasta la actualidad (papel protagonista del Sol) y otras que han sido rebatidas, afortunadamente, en aras al avance de la ciencia atmosférica. Pero tendrían que pasar algunos siglos para que comenzaran a desentrañarse los secretos del funcionamiento climático del planeta respecto a las ideas aristotélicas que defendieron eruditos romanos, como Plinio el viejo, y de época medieval (San Alberto Magno).

Y será precisamente la ampliación de los horizontes geográficos, el descubrimiento de nuevas tierras a partir del siglo XV, los que resultarán decisivos para el avance de la meteorología y climatología terrestre. Y en esto tienen un protagonismo destacado nuestros viajeros al Nuevo Mundo que luego dejaron escritos de sus experiencias en aquellas tierras. El jesuita José de Acosta, cronista de Indias, fue el primero que desterró científicamente la idea aristotélica de que en las tierras próximas al Ecuador no podía haber vida humana por el supuesto calor tórrido que allí se registraba. Nada mejor como la visita personal a las regiones geográficas en cuestión –ámbito intertropical- para comprobar que eso no es así, que en la línea ecuatorial y sus territorios próximos el clima tropical lluvioso y con temperaturas cálidas, pero no tórridas, permite la vida humana, como sabemos. En los escritos del padre Acosta<sup>1</sup> descubrimos, también, que el aire se enrarece con la altitud ocasionando malestar y dolor de cabeza (soroche) cuando se asciende a una alta cumbre, y conocimos un fenómeno climático que ocupa portadas en los medios de comunicación en la actualidad, el famoso “Niño” que trastorna la circulación de la atmósfera algunos años dando lugar a lluvias donde no suele llover y a sequías donde lo hace habitualmente. Son avances fundamentales para las ciencias del tiempo atmosférico y del clima, cuyo contenido se perfeccionará en los siglos siguientes cuando se disponga de aparataje para realizar mediciones precisas de los elementos climáticos (temperatura, presión, humedad, lluvia, radiación solar, etc.).

---

<sup>1</sup> Ver. ACOSTA, J. de, *Historia Natural y Moral de las Indias*, 1590. Ed. José Alcina Franch, Madrid, Ed. Historia 16. Crónicas de América nº 34, 1987, 515 p.



### La importancia de disponer de aparatos de medida.

En efecto, toda ciencia que se precie requiere de un instrumental básico para obtener los datos que permiten proponer o comprobar hipótesis y establecer teorías, manejando, claro está, métodos de trabajo que permitan la universalidad de los resultados obtenidos. Así ocurrió también con la meteorología que fue completando la relación del aparatage básico para la observación y medición de las variables climáticas a lo largo de la Edad Moderna. Estamos en un contexto científico y filosófico que, además, hace una apuesta clara por la experimentación y la toma de datos como paso previo a la formulación de teorías (Galileo, Bacon, Hume, Descartes, Newton).

El siglo XVII es el siglo de la aparición de los aparatos de medida de los elementos atmosféricos, que se irán perfeccionando en los siglos posteriores. Galileo inventaría el primer instrumento capaz de medir los cambios de temperatura: el termoscopio neumático (1607). En 1639, Benedetto Castelli idea un primer pluviómetro que será perfeccionado en 1662 por Christopher Wren con un sistema de cubetas basculantes y mejorado en 1670 por Robert Hooke. En 1641, Fernando II, Gran Duque de Toscana, construye el termómetro de bulbo de alcohol con capilar sellado; el instrumento estaba provisto de un tubo de vidrio con alcohol marcado con 50 grados, pero no utilizó el cero como un punto fijo. Por su parte, en 1644, tras llevar a cabo su famoso experimento, Torricelli construye el primer barómetro de mercurio. El primer higrómetro nació de la inventiva del físico francés Guillaume Amontons que lo presentaría en 1687 en la Academia de Ciencias francesa. Por último, el primer anemómetro para la medida de la velocidad del viento lo construye en 1667 Robert Hooke. La puesta a punto de este instrumental meteorológico permitirá el desarrollo de los primeros embriones de redes meteorológicas. La primera de ellas, integrada por una decena de observatorios, fue instalada, a instancias del Gran Duque Fernando II de Toscana, por Luigi Antinori y funcionó entre 1654 y 1667. Será el germen de otras redes de observación que se irán ampliando y consolidando en los siguientes siglos y hoy son una

pieza fundamental para las predicciones meteorológicas y los estudios climáticos.

En el estudio de los elementos atmosféricos, la medida de la presión atmosférica fue, sin duda, uno de los problemas importantes que tuvo que abordar la ciencia en el siglo XVII. Desde la época de Aristóteles habían perdurado dos ideas erróneas y generalmente admitidas. La primera de ellas era que el aire no pesaba y la segunda que no existía el vacío. Galileo rechazará ambas cuestiones y demostrará, mediante una serie de experimentos, que el aire pesa. Años más tarde, en 1643, su discípulo Torricelli resolvería el enigma, llevando a cabo una serie de experimentos en su laboratorio, llenando de mercurio un tubo de 1 metro de largo, (cerrado por uno de los extremos). Invertió dicho tubo sobre una cubeta llena de mercurio, de inmediato la columna de mercurio descendía por término medio, hasta una altura de 76 centímetros (760 mm). Torricelli interpretó que a esa altura se producía la influencia de la presión atmosférica. La comprobación en campo de este hecho la realizó, unos años después, en 1648, Florin Périer, por encargo de su cuñado Blaise Pascal, al medir la altura de una columna de mercurio a tres altitudes diferentes, durante su ascenso al Puy de Dome. En este experimento se demostró que la presión atmosférica decrecía con el incremento de altitud, si bien ese descenso resultaba cada vez menos rápido. Por su parte, en 1656, el alemán Otto von Guericke demostraría la existencia del vacío con su célebre experimento de los hemisferios de Magdeburgo, señalando que la presión atmosférica equivalía a un peso muy considerable.

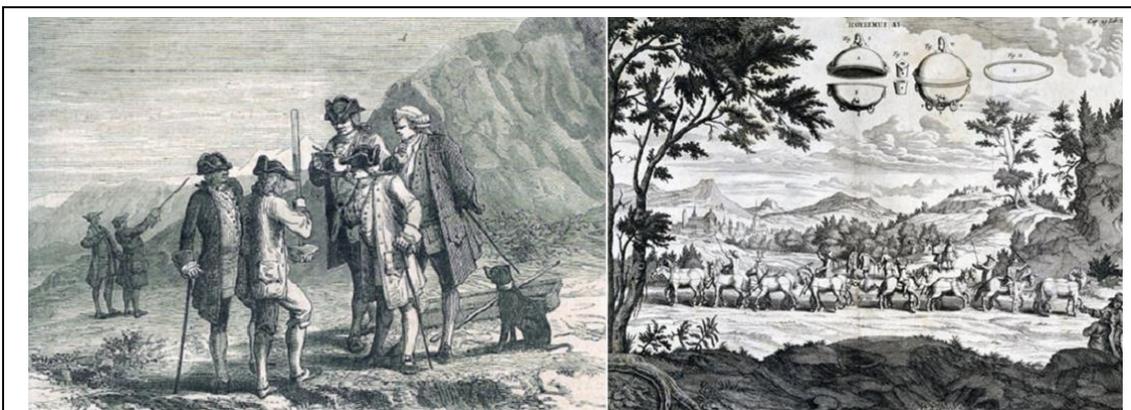


Fig.2. (Izda.) Experimentos de Blaise Pascal en el Puy de Dome (modificación de la presión atmosférica con la altitud) y (Dcha.) de Otto von Guericke (demostración de la existencia del vacío). Fuente: MeteoFrance y Experimenta Nova (1672).

Antes de que concluya el siglo XVIII se dispone de las cuatro escalas termométricas más difundidas, esto es, las de Fahrenheit (1724), con importante perduración aún en el ámbito anglosajón, Reamur (1730), Celsius y la escala centígrada, estas dos últimas tenidas erróneamente por equivalentes. Hay que recordar que Anders Celsius propuso en 1742 el uso de una escala donde se atribuía el valor  $100^{\circ}$  al punto de fusión del hielo y  $0^{\circ}$  al de ebullición del agua, es por tanto inversa a la denominada "centígrada". Esta última sería difundida en Suecia tres años después por Linneo, aunque ya había sido manejada en esta posición por Jean-Pierre Christi en Francia en 1743, en su

famoso “termómetro de Lyon” donde asignó el valor 0° al punto de fusión del hielo y 100° al de ebullición del agua.

El resultado de la puesta a punto del instrumental meteorológico favorecerá el desarrollo de observaciones atmosféricas sistemáticas durante la segunda mitad del siglo XVIII y, sobre todo, en el último cuarto de esa centuria, cuando se proponen los primeros embriones de redes o servicios meteorológicos. En la creación y consolidación de estas redes de observación meteorológica jugarán un papel destacado las Sociedades de Medicina, debido a la relación entre el desarrollo de enfermedades y las condiciones atmosféricas de un territorio. Esta relación encontrará argumento filosófico dentro del ambientalismo que impulsarán algunos ilustrados de la época.

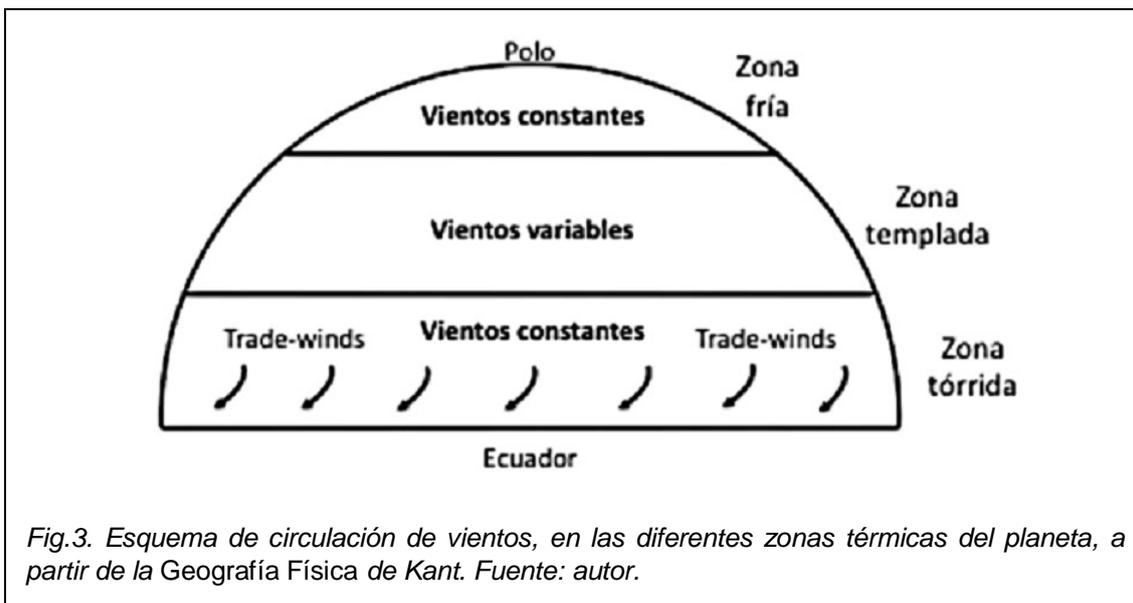
### **Una obsesión constante en la Edad Moderna: cómo soplan los vientos. La importantísima –y desconocida- aportación del filósofo-geógrafo Kant.**

Junto a la aparición del instrumental meteorológico y de las primeras redes de recopilación sistemática de datos de los elementos atmosféricos principales (temperaturas, precipitación, presión, humedad, viento), los siglos XVII y XVIII supondrá un salto importante para el conocimiento de la circulación atmosférica y del reparto de los climas terrestre.

Un tema principal para la filosofía natural y la física durante este período fue desgranar el funcionamiento del viento. Al inicio de este período, las ideas de Aristóteles dominaban el pensamiento en esta cuestión. Para él el viento tiene por causa el Sol que mueve o transforma las “exhalaciones” seca y húmeda que existen en el aire. En dos siglos estas ideas experimentarán un vuelco radical y se irá conformando el corpus teórico de física del aire que resultará básico para la comprensión de la dinámica atmosférica. Diversos autores irán haciendo aportaciones para descifrar el movimiento de los vientos terrestres y, muy particularmente, de los vientos alisios, por su transcendencia para la navegación y el comercio entre Europa y los territorios conocidos y colonizados de África, América y Asia. Kepler, Bacon, Halley, Vareño, Lister y Hadley son los autores que realizan explicaciones para entender la circulación de los vientos en la superficie terrestre, sus trayectorias, su encorvamiento. La rotación terrestre comenzará a jugar un papel importante en esta explicación: los vientos “se retrasan” o “se adelantan” respecto a la velocidad lineal de rotación terrestre. En algún caso –Halley- se pensará que los vientos que se generan por el calor existente en el Ecuador soplarán, elevándose en la atmósfera terrestre, hasta el Polo y desde allí descenderán de nuevo al Ecuador generando un circuito único: la denominada “chimenea ecuatorial”. Esta teoría será desterrada años después por Hadley que precisará, con acierto, que ese circuito se interrumpe en latitudes subtropicales (hacia 30° de latitud), puesto que a partir de entonces y hasta el polo circulan vientos con otra componente, básicamente del oeste. Idea que se mantendrá hasta la actualidad, mejorando el conocimiento de aspectos regionales que inciden en la circulación de los vientos alisios.

En el tramo final de la edad Moderna, resultarán muy importantes y poco conocidas, las aportaciones a la ciencia climática de Immanuel Kant. Kant fue

un polímata, sin duda, uno de los mejores pensadores de la historia de la Humanidad; pero no solo fue filósofo. Fue también un geógrafo cuajado. O al menos eso traduce haber enseñado geografía durante cuarenta años en la universidad de Königsberg. Sus discípulos recopilaron sus apuntes en una Geografía Física, que reúne los conocimientos existentes en ese momento de la disciplina. Pero, además, en sus apuntes manuscritos, incluyó aportaciones novedosas para la explicación de hechos y fenómenos de la Naturaleza. Los capítulos que dedica a la explicación de fenómenos atmosféricos y hechos climáticos pueden considerarse como el primer manual editado de Climatología (1802). El viento y, en general, el movimiento del aire es el elemento climático más importante para Kant; describe las características de los vientos conocidos en su época y busca explicar sus causas. Y aporta un esquema novedoso de la circulación atmosférica en el globo terrestre. Según Kant “los vientos son más variables en la mitad entre un polo y el Ecuador. Tanto en la zona cálida y regiones adyacentes como en el cinturón frío y zonas vecinas son mucho más constantes”<sup>2</sup>. Señala que los cambios en el viento originados en una columna atmosférica, que pueden llegar a provocar “calmas y tormentas repentinamente o viento cambiante en los territorios bajos”. Este último aspecto tendrá gran interés porque inaugura la serie de estudios sobre el espesor de las capas atmosféricas, que constituirán referencia esencial para la navegación aerostática en el siglo XIX; aunque será ya en el siglo XX, con el desarrollo de la aviación y, posteriormente, de los satélites de finalidad meteorológica, cuando reciban completa y detallada explicación.



### Dos siglos decisivos para el “descubrimiento” de la atmósfera terrestre.

El siglo XIX comienza con la propuesta de clasificación de las nubes que elaboró un farmacéutico inglés, Luke Howard. El fue el que dio nombre científico a las nubes en 1803, utilizando denominaciones en latín alusivas a su

<sup>2</sup> Ver. Kant, I. *Physical Geography* [Rink’s edition, 1802]. Vol. I, Introduction. §1, 2, 3, 4, y 5. (In. Watkins, E. (edit.) (2012) *Natural Science. The Cambridge edition of the Works of Immanuel Kant in translation*. San Diego, University of California, 818 p.

forma (stratus, empedrado; cirrus, mechón de pelo; cumulus, montón; nimbus, chaparrón). La clasificación de Howard tuvo eco muy favorable en los círculos científicos y culturales de la época. Entre 1821-22, el pintor inglés John Constable realizaría su “Estudio de nubes” basándose en la clasificación de Howard; por su parte, el genial polímata alemán J.W. Goethe manifestaría, en su “Ensayo sobre Meteorología”, las excelencias del sistema de Howard. Esta clasificación será la base del Atlas Internacional de Nubes de la Organización Meteorológica Mundial que se mantiene, con añadidos, hasta la actualidad. La última versión de este Atlas es del año 2017 y se puede consultar íntegramente en la red.

La descripción de los climas terrestres tuvo una aportación fundamental en los trabajos de A. de Humboldt, el noble prusiano de saber enciclopédico que viajó al Nuevo Mundo y nos dejó escritos extraordinario sobre su naturaleza y sus climas. En el inmenso haber científico de Humboldt destaca un hecho fundamental para la geografía ibérica: la verificación de la Meseta central española, descifrada a partir de las mediciones del barómetro en diferentes puntos de observación. Y también son destacables la invención y uso de unas isólineas planteadas por el naturalista alemán, necesarias para la representación cartográfica de los elementos del clima mundial como la isoterma y la isobara. El otro gran impulsor de la ciencia geográfica en la primera mitad del siglo XIX, el erudito alemán K. Ritter, destacará la importancia del clima en la distribución de las civilizaciones del mundo.

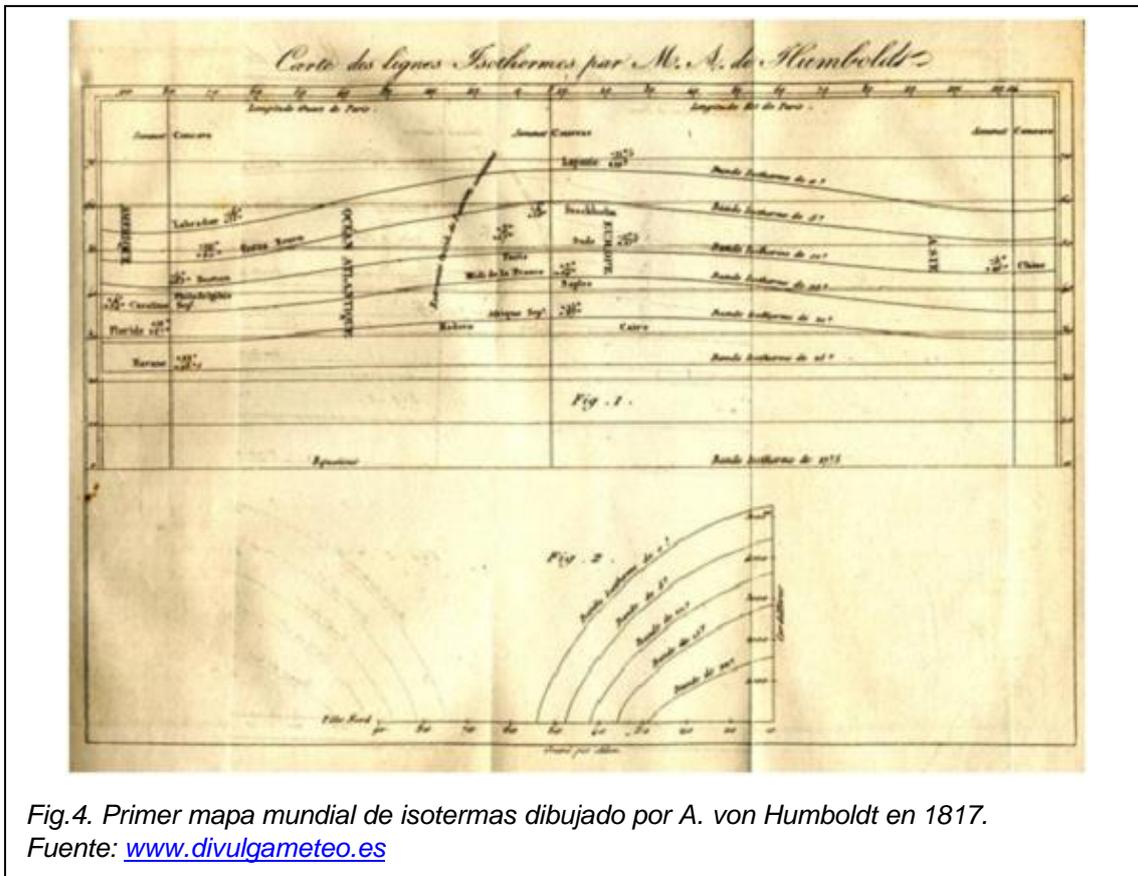


Fig.4. Primer mapa mundial de isotermas dibujado por A. von Humboldt en 1817.  
Fuente: [www.divulgameteo.es](http://www.divulgameteo.es)

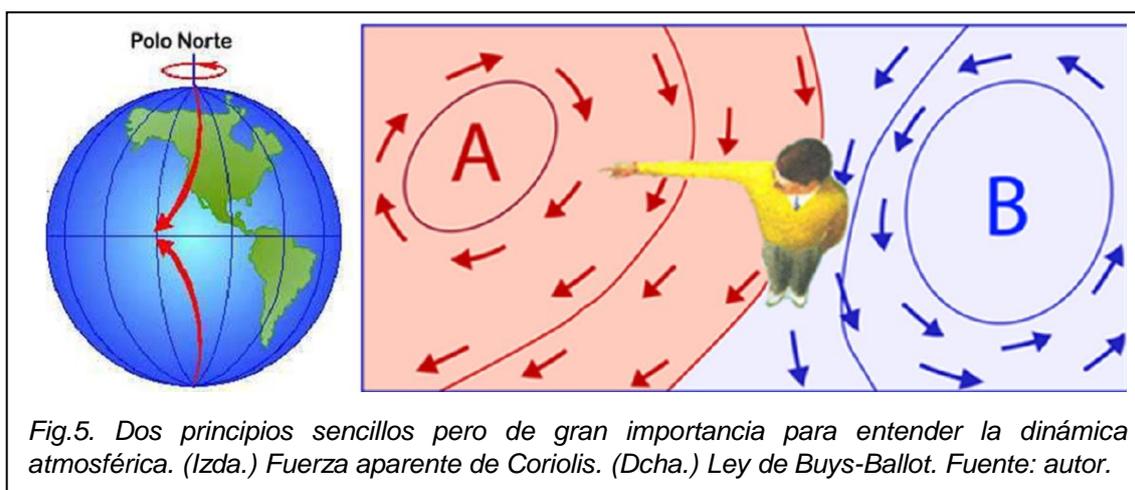
La dinámica de la atmósfera y la estructura interna de los centros de presión atmosférica (borrascas y anticiclones) son dos aspectos que avanzan de modo importante a lo largo del siglo XIX, en relación con el propio progreso de la física y las matemáticas. Y a ello se sumará el progresivo protagonismo que irá teniendo la circulación atmosférica en las capas altas que hoy se sabe esencial para los pronósticos meteorológicos. Se formularán, desde las primeras décadas de esta centuria, una serie de modelos explicativos del funcionamiento de las depresiones barométricas, que era lo que más interesaba en Europa central y septentrional de donde proceden los autores de las mismas.

El físico prusiano Dove enunciará su teoría cinética de las tempestades advirtiendo por vez primera que en el hemisferio norte el viento en las borrascas gira en sentido contrario al de las agujas del reloj y a la inversa en el hemisferio sur. Brandes, por su parte, dibujará en 1819 el primer mapa de distribución de presiones en superficie (mapa de tiempo) indicando las desviaciones respecto del valor medio, para lo cual utilizó las observaciones practicadas años atrás por la Sociedad Meteorológica Palatina. Este meteorólogo alemán enunciará su famosa teoría de circulación del viento en los sistemas de presión según la cual el viento sopla de los sectores de mayor presión a los de menos, siendo desviado hacia la derecha, en el Hemisferio norte, por la rotación terrestre. Otra contribución destacada de Brandes será su apreciación sobre el hecho de que las depresiones sobre el continente europeo se desplazan de oeste a este.

Dos leyes de la dinámica de fluidos, sencillas de formulación, permitirán comprender el movimiento del viento en relación con la rotación terrestre y con la presión atmosférica. La primera es la ley formulada por el científico francés Gaspard-Gustave Coriolis formulada en 1835, en realidad es la explicación de una fuerza dinámica afectada por la rotación terrestre –la denominada “fuerza de Coriolis”-. En realidad se trata de una fuerza ficticia que aparece cuando un cuerpo está en movimiento con respecto a un sistema en rotación. La fuerza de Coriolis siempre es perpendicular a la dirección del eje de rotación del sistema y a la dirección del movimiento del cuerpo vista desde el sistema en rotación. En síntesis, este principio se puede enunciar del siguiente modo: “Todo cuerpo que es impulsado o adquiere movimiento propio en un sistema rotatorio, como la superficie de la Tierra sufre una desviación lateral en sentido horario (hacia su derecha) en el hemisferio norte y en sentido antihorario (hacia su izquierda) en el hemisferio sur”. En síntesis, cualquier objeto en movimiento horizontal y que se desplaza sobre un sistema rotatorio, sufre una aceleración complementaria que lo desplaza lateralmente, en una dirección perpendicular a la dirección del movimiento del objeto. La comprobación de este hecho se ha hecho popular, e incluso reclamo turístico en localidades situadas en la línea ecuatorial, donde se muestra el giro que adquiere el agua que se escapa por la cañería de un lavabo, a uno u otro lado de la misma.

La segunda vendrá de la mano del meteorólogo holandés Buys-Ballot, quién en 1860 enunció su famosa ley de dinámica atmosférica: “Si una persona se coloca de espaldas al viento con los brazos en cruz, la presión atmosférica que soporta su mano izquierda es inferior a la que soporta su mano derecha”, por lo que las bajas presiones quedarán a su izquierda. En este contexto de

avances teórico-prácticos en el conocimiento de la dinámica atmosférica, unos años antes, el físico alemán Helmholtz había enunciado el principio de conservación de la energía y en 1864 el químico noruego Guldeberg formuló la ley de acción de masas de los equilibrios físico-químicos.



*Fig.5. Dos principios sencillos pero de gran importancia para entender la dinámica atmosférica. (Izda.) Fuerza aparente de Coriolis. (Dcha.) Ley de Buys-Ballot. Fuente: autor.*

Desde Estados Unidos, Redfield estudiará los ciclones tropicales, de tanta trascendencia en este país; y Espy, dibujará mapas de tiempo indicando el rumbo de los vientos. Pero la figura más destacada será el marino Maury que en 1848 publicará una serie de cartas náuticas con indicación de los vientos dominantes en cada sector oceánico del mundo gracias a las cuales el viaje de ida y vuelta de Londres a Sidney se redujo a 160 días, cuando antes requería doscientos cincuenta.

La invención y difusión del telégrafo eléctrico en los países occidentales en las décadas centrales del siglo XIX permitió la transmisión rápida de datos meteorológicos, obtenidos en las redes de observación que van desarrollando diferentes países de Europa, América y Asia. En 1865 se estableció la Unión Telegráfica Internacional; el número de líneas y de mensajes transmitidos crecería exponencialmente a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX y primeros años del XX. Ello supuso mejoras evidentes en la predicción meteorológica que podía disponer de datos de áreas geográficas diversas para la confección de mapas sinópticos y de boletines de pronóstico. Un acontecimiento bélico será determinante para el impulso de la creación de una red meteorológica entre países. El hundimiento a causa de una tempestad del navío de guerra Henri IV (13 de noviembre de 1854), que formaba parte de la flota anglo-franco-turca y piemontesa que operaba contra los rusos en la guerra de Crimea. La magnitud del desastre llevó a Napoleón III a preguntar al meteorólogo Le Verrier si se podría haber evitado de haberse conocido la llegada de dicha borrasca intensa, a lo que el meteorólogo francés respondió afirmativamente siempre y cuando se constituyera una red de vigilancia y aviso, mediante mensaje telegráfico, en los países europeos. Poco a poco, se consolidará la idea de crear un organismo internacional para fines meteorológicos, donde colaboraran todos los países ofreciendo sus datos y servicios de pronóstico. Esto ocurrirá en 1873 con la creación de la Organización Meteorológica Internacional, cuyo primer presidente será, justamente, el meteorólogo holandés Buys-Ballot. La OMI será el germen de la

actual Organización Meteorológica Mundial (OMM) organismo de las Naciones Unidas dedicado a las cuestiones del tiempo y clima mundiales.

Los últimos decenios del siglo XIX resultan muy activos en avances de las ciencias atmosféricas. Una serie de autores publicarán sus estudios sobre dinámica meteorológica, y sobre las diferentes capas que componen la atmósfera terrestre en relación con la mejora de los medios de navegación aérea (globos aerostáticos).

Destacarán los trabajos de Teiserenc de Bort que investigará con globos sonda sobre los niveles superiores de la atmósfera, y será descubridor de la “estratosfera”, además de reconocer la capacidad predictiva de la ciencia atmosférica en relación con los avances que se estaban produciendo a finales del siglo XIX. Hildebranson y Abercromby adaptarán la clasificación de nubes de Howard para convertirla en un catálogo que sería oficialmente adoptado por la recién creada Organización Meteorológica Internacional (1896). El alemán van Bebbber describirá en 1891 y sistematizará la trayectoria de las borrascas que desde el Atlántico penetran en el continente europeo en su desplazamiento hacia el este. Y el también alemán W. Koppen propondrá en 1903 una de las clasificaciones climáticas más utilizadas desde entonces, que manejaba valores medios de temperatura y precipitación para asignar con letras mayúsculas y minúsculas la adscripción de un observatorio a una variedad climática.

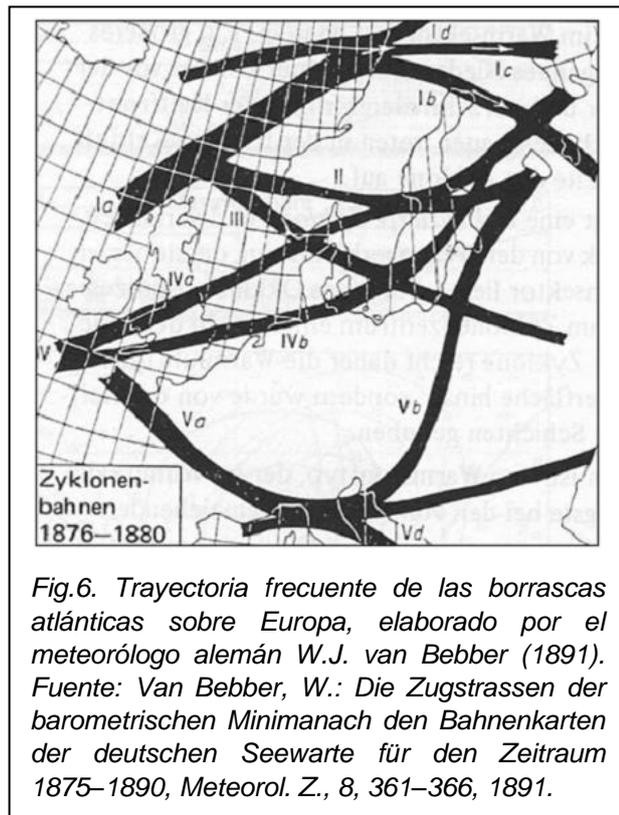


Fig.6. Trayectoria frecuente de las borrascas atlánticas sobre Europa, elaborado por el meteorólogo alemán W.J. van Bebbber (1891). Fuente: Van Bebbber, W.: Die Zugstrassen der barometrischen Minimanach den Bahnenkarten der deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875-1890, Meteorol. Z., 8, 361-366, 1891.



Fig.7. Primer mapa de tiempo publicado en un periódico. The Times, 1 de abril de 1875. Fuente: <http://galton.org/meteorologist.html>

Y a ello se une el valor “social” de la meteorología, la popularización de la ciencia atmosférica, que vendrá de la mano de la publicación por el diario The Times del primer mapa de tiempo el 1 de abril de 1875. Dicha carta isobárica fue elaborada por Sir Francis Galton, psicólogo, antropólogo y geógrafo británico que había publicado, en 1863, su Meteorographica, primer ensayo sobre métodos de representación cartográfica del tiempo atmosférico, donde Galton propone una simbología propia para la elaboración de cartas sinópticas. A partir de ese momento,

diferentes periódicos europeos y estadounidenses incorporarían progresivamente una sección de información del tiempo atmosférico con reproducción de cartas isobáricas.

Los estudios de clima formarán una pieza importante de los ensayos que diversos autores, desde la geografía (Ratzel, Semple, Huntington), publicarán en las últimas décadas del siglo XIX y primeras del XX, en el contexto de la corriente filosófica del ambientalismo desarrollada a partir del evolucionismo de Darwin, destacando el papel del clima como elemento “condicionador” (determinismo climático) de la distribución de poblaciones y razas en el mundo. Estos escritos hay que interpretarlos en el contexto histórico en el que se publicaron; hoy rebasarían los límites de la racionalidad. No en vano, algunos de sus argumentos fueron utilizados por ideologías fascistas de la época para justificar la idea de la superioridad.

El siglo XX es un siglo de mejoras tecnológicas innegables que hoy son fundamentales para las ciencias atmosféricas (radiosondeos, aviación, satélites, computación). Pero es también una centuria de avances teórico-metodológicos necesarios para el desciframiento de la circulación atmosférica general y del funcionamiento de fenómenos meteorológicos (borrascas, ciclones, “corrientes en chorro”). En su primera mitad habrá una relación muy estrecha entre mejoras en el conocimiento de la atmósfera y su dinámica y la evolución del aparataje y la estrategia bélica (radar, “frente”). En su segunda parte vendrá condicionado por la formulación de la hipótesis de calentamiento térmico planetario y su progresiva comprobación que ocupa también estos primeros años del siglo XXI.

Comienza el siglo con un hito básico para la meteorología, la creación en 1917 de la Escuela Noruega de Bergen sin cuyo legado no se puede entender el avance contemporáneo de las ciencias atmosféricas. De este centro surgirán teorías y modelos de dinámica atmosférica esenciales: “frente polar” y proceso de ciclogénesis, estructura de las borrascas extratropicales, llamadas “noruegas” en su honor, distribución de las masas de aire en la superficie terrestre. Bjerkness, Bergeron, Solberg, Petterssen son algunos de sus miembros más destacados. Otros, como Rossby cobrará protagonismo en los años de la II Guerra Mundial y postguerra posterior, cuando descubre la clave de la circulación atmosférica en la alta atmósfera con su modelo ondulatorio (ondas de Rossby) que explica la dinámica en latitudes medias y altas como un continuo movimiento de masas de aire generado por corrientes de viento a alta velocidad (corriente en chorro o jet stream) y con efecto de la rotación terrestre. La denominación de “frente polar” propuesta por Bjerkness y Solberg, alusiva a la superficie de enfrentamiento entre una masa de aire polar y otra tropical sobre una superficie oceánica (océano Atlántico), alude a la fase bélica de la guerra de frentes que ocupó un largo período de la I Guerra Mundial.

Un nuevo y fundamental descubrimiento para las ciencias de la atmósfera tiene lugar en la Segunda Guerra Mundial en relación con la navegación aérea de guerra. Se descubre la existencia de corrientes de viento a gran velocidad en las capas altas de la atmósfera terrestre, a las que se bautizó con el nombre de “jet stream” (corriente en chorro), cuya circulación determina los movimientos de la atmósfera en las capas bajas, donde se

mueven las borrascas y los anticiclones, que vemos a diario en la información meteorológica de los medios de comunicación. En su descubrimiento, se disputan la autoría japoneses y norteamericanos que habrían encontrado estos vientos de alta atmósfera en los vuelos de los bombarderos de la guerra en el Pacífico. El descubrimiento de estas corrientes de viento a gran velocidad en la alta troposfera resultó fundamental no sólo para los estudios de meteorología y climatología, sino también para la navegación aérea transoceánica. El uso comercial de la corriente en chorro por la navegación aérea comenzó, el 18 de noviembre de 1952, cuando un vuelo de la compañía Pan Am entre Tokio y Honolulu se situó sobre la corriente en chorro polar a una altitud de 7.600 metros y pudo reducir el tiempo de viaje entre estas dos ciudades en más de un tercio, lo que significaba, asimismo, un importante ahorro de combustible.

Dos inventos de finalidad bélica también serán determinantes en el avance posterior de la meteorología. El radar (siglas de Radio Detection And Ranging) que debe mucho a las investigaciones de Nicola Tesla, fue creado en el Reino Unido en su modelo actual en 1935, sin olvidar algún antecedente alemán previo. Su empleo fue decisivo para el resultado del segundo conflicto bélico mundial, pero también para la ciencia meteorológica, puesto que ya en este período bélico, los operadores de radar notaban “ecos” de retorno de causados por tormentas. Será en la década de los años cincuenta del siglo XX, cuando la fuerza aérea de Estados Unidos comprobará su efectividad para la detección de fenómenos atmosféricos acuosos (lluvia, granizo, nubes de desarrollo...). Y a partir de 1964 se difundió su empleo para la predicción meteorológica en los países desarrollados, con modelos de respuesta doppler. Recordemos que el radar es un sensor “activo” que lanza un haz de ondas desde un punto fijo o móvil (avión) y espera la respuesta (eco) del objeto que interfiera en su trayectoria. En la actualidad los modelos mejorados de radar doppler son pieza básica para el “nowcasting” (predicción a corto plazo) meteorológico.

Algunos años después, en plena “guerra fría” y en el fragor de la carrera espacial, se desarrollará el segundo invento esencial para la meteorología y climatología modernas: el satélite de finalidad meteorológica. Recordemos que los soviéticos serían los primeros en lanzar un satélite al espacio (Sputnik-1) el 4 de octubre de 1957; pero serían los americanos, tres años después, el 1 de abril de 1960, los que pondrían en órbita durante poco más de dos meses, el primer satélite de finalidad exclusivamente meteorológica (Tiros-1). Desde entonces la tecnología satelital no ha dejado de mejorar y el programa de lanzamiento de satélites meteorológicos ha ido al alza en todo el mundo. Según su órbita se distinguen entre satélites de órbita polar, situados por término medio a 800 km. de la superficie terrestre, y satélites de órbita geoestacionaria, a 36.000 km. de la Tierra, situados en un punto fijo dentro del “anillo de Clark”, en honor al científico y divulgador Arthur C. Clark, autor del texto que dio origen a la película “2001, una odisea en el espacio”. Los polares tienen más resolución espacial, los segundos, más resolución temporal. Hoy en día no se entendería la predicción meteorológica y los estudios de clima regional sin la posibilidad de disponer de una imagen de satélite que, complementada con imágenes de radar, de sensores de actividad eléctrica y datos meteorológicos de estaciones de superficie, permiten ajustar los modelos

de pronóstico y mejorar el conocimiento de fenómenos meteorológicos singulares (tormentas convectivas, ciclones tropicales, tornados). En 1963 la Organización Meteorológica Mundial, heredera de la anterior Organización Meteorológica Internacional (vid. supra), puso en marcha su programa de Vigilancia Meteorológica Mundial, que es una pieza esencial de este organismo para el mejor conocimiento del tiempo y clima mundiales. En la actualidad está compuesto con varias unidades de satélite (polar y geoestacionario) y miles de puntos de observación en tierra y océanos.

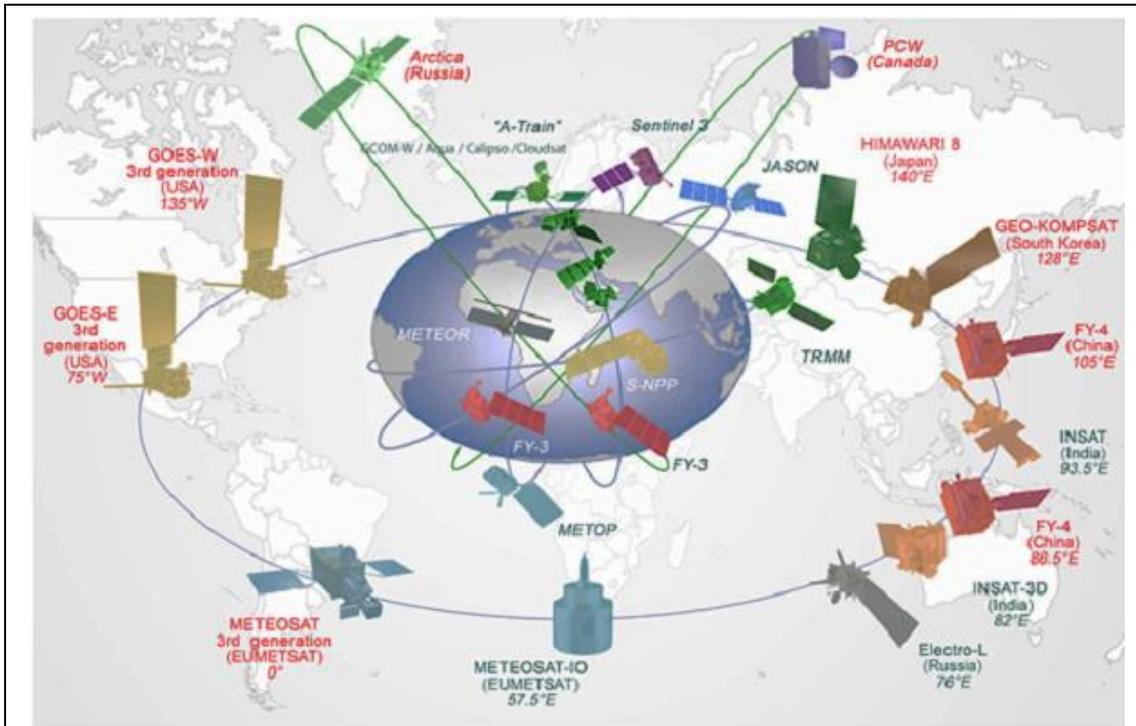


Fig.8. Programa mundial de Vigilancia Meteorológica. Satélites meteorológicos (2019). Fuente: OMM.

La aparición de los computadores, la mejora de los métodos matemáticos de tratamiento de datos y los avances en la dinámica de fluidos, en la química atmosférica (p.e. ozono estratosférico y troposférico) y en el mecanismo del balance energético del planeta han conducido a una mejora constante, “explosiva” por sus constantes progresos, de las ciencias atmosféricas en las últimas décadas del siglo XX. Se ha fijado el modelo de circulación atmosférica general que hoy se sabe tricelular (célula de Hadley, célula de Ferrel, célula polar) y condicionado por el movimiento de los vientos en la alta troposfera (corrientes en chorro ecuatorial, subtropical, polar y ártica). Se conoce casi con exactitud el balance energético del sistema Tierra-atmósfera, que resulta pieza clave del funcionamiento climático terrestre y de sus cambios. No en vano el actual proceso de “cambio climático” no es sino una alteración “humana” en dicho balance, puesto que la radiación de onda larga que emite la superficie terrestre y los océanos hacia el espacio exterior se queda confinada en los primeros kilómetros de la atmósfera terrestre al ser obligada a “rebotar” hacia el suelo por la acción de los “gases de efecto invernadero” de causa antrópica (CO<sub>2</sub>, metano, etc.). Se ha avanzado, asimismo, en el conocimiento de un proceso atmosférico-oceánico de gran

impacto regional (el conocido como “Niño”, en realidad fenómeno ENSO) que aunque tiene su escenario de acción en la cuenca meridional del Pacífico, sus conexiones de circulación atmosférica, afectan a casi todo el mundo. Tras las primeras investigaciones sobre este fenómeno, relatado ya por el padre Acosta en el siglo XVI, como se ha señalado (vid. supra), a comienzos del siglo XX, fue en la década de los años sesenta del pasado siglo cuando se esbozaron las ideas principales de su funcionamiento y de la estrecha relación existente entre las dinámicas atmosféricas y oceánicas en dicha región del Pacífico. Este hecho ha sido clave para impulsar el conocimiento de otros mecanismos de oscilación atmosférico-oceánicas que existen en la superficie terrestre y oceánica de nuestro planeta, como la NAO, en el Atlántico Norte con importante efecto en el tiempo y clima de Europa.

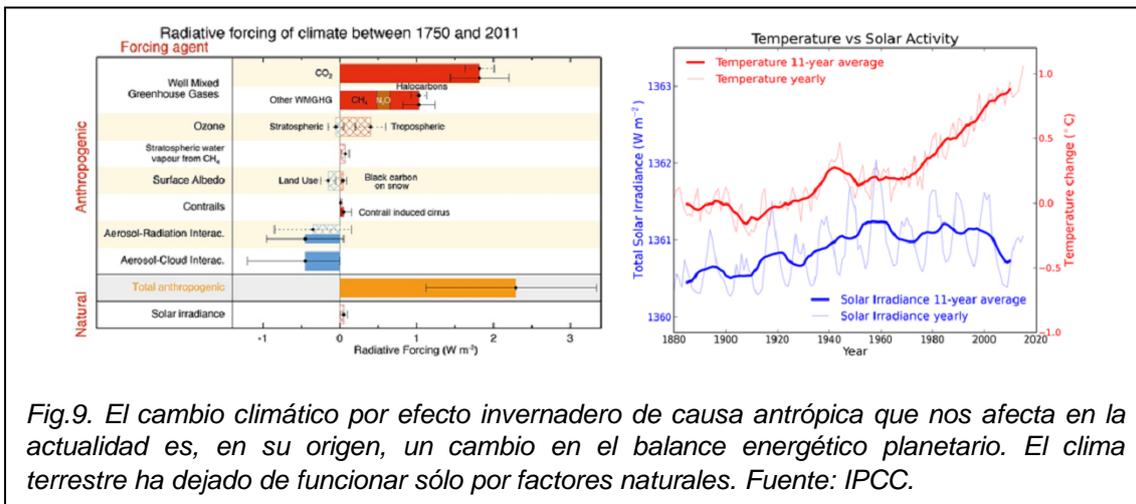


Fig.9. El cambio climático por efecto invernadero de causa antrópica que nos afecta en la actualidad es, en su origen, un cambio en el balance energético planetario. El clima terrestre ha dejado de funcionar sólo por factores naturales. Fuente: IPCC.

La precisión en los estudios de clima regional ha alcanzado niveles de excelencia, gracias al manejo de técnicas estadísticas y nuevos métodos de representación cartográfica (teledetección y Sistemas de Información Geográfica, SIGs). Se analizan series amplias de datos, mapas e imágenes para comprobar la evolución de las variables meteorológicas en un territorio (climatología analítica) o comportamientos de los sistemas de presión atmosférica (tipos de tiempo) y se avanzan comportamientos futuros (modelización).

Pero sin duda, el elemento que aglutina gran parte de los enfoques y de los avances en tiempo y clima es el referido “cambio climático” por calentamiento generado por causa antrópica. Esta hipótesis de trabajo, lanzada por varios investigadores en los años ochenta del pasado siglo, se ha convertido en un eje de investigación fundamental en todo el mundo. Y también en un argumento de políticas públicas, puesto que su mitigación depende, en buena medida, de la acción de los gobiernos en todo el mundo aprobando y cumpliendo acuerdos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, causantes de la alteración del balance energético planetario y, en consecuencia del calentamiento en capas bajas de la atmósfera terrestre. Sin olvidar las acciones de adaptación a los efectos previstos de dicho calentamiento durante las próximas décadas que ocupan programas en las escalas estatales, regionales y locales. En 1988 se creó el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), dependiente de las

Naciones Unidas, que es el organismo que tiene la responsabilidad de aprobar los informes de cambio climático en el mundo, que se elaboran regularmente. En la actualidad está en fase de elaboración el VI Informe del IPCC que tiene prevista su aprobación en 2021-22.

### ¿Y en el futuro?...reflexión final.

Como ha ocurrido en otras ciencias, el impulso contemporáneo en los conocimientos de la atmósfera terrestre ha sido intenso. Y lo sigue siendo. Pero este hecho no debe hacernos olvidar la historia de una ciencia milenaria de enorme influjo en el ser humano. Se ha pasado de responsabilizar a los dioses de los panteones mitológicos de las religiones antiguas (egipcia, sumeria, griega, romana) de los acontecimientos atmosféricos y climáticos, a disponer de una información detallada y puntual del estado del tiempo en nuestros teléfonos móviles. El futuro pasa por la inversión constante en investigación de la atmósfera que debe responder a una demanda social cada vez más exigente. Queremos saber el tiempo que va a hacer en mi ciudad, en mi barrio, con toda precisión. Y, en los próximos años, vamos a querer saber también con exactitud cuál va a ser el clima que tenga mi ciudad o mi barrio dentro de cuatro o cinco decenios. Seguramente ni una petición ni la otra podrá ser atendida al cien por cien, porque recordemos que la atmósfera terrestre es un sistema caótico cuyo conocimiento exhaustivo seguramente nunca alcanzaremos. Pero en doscientos años nos hemos ido aproximando a ese conocimiento de forma increíble.

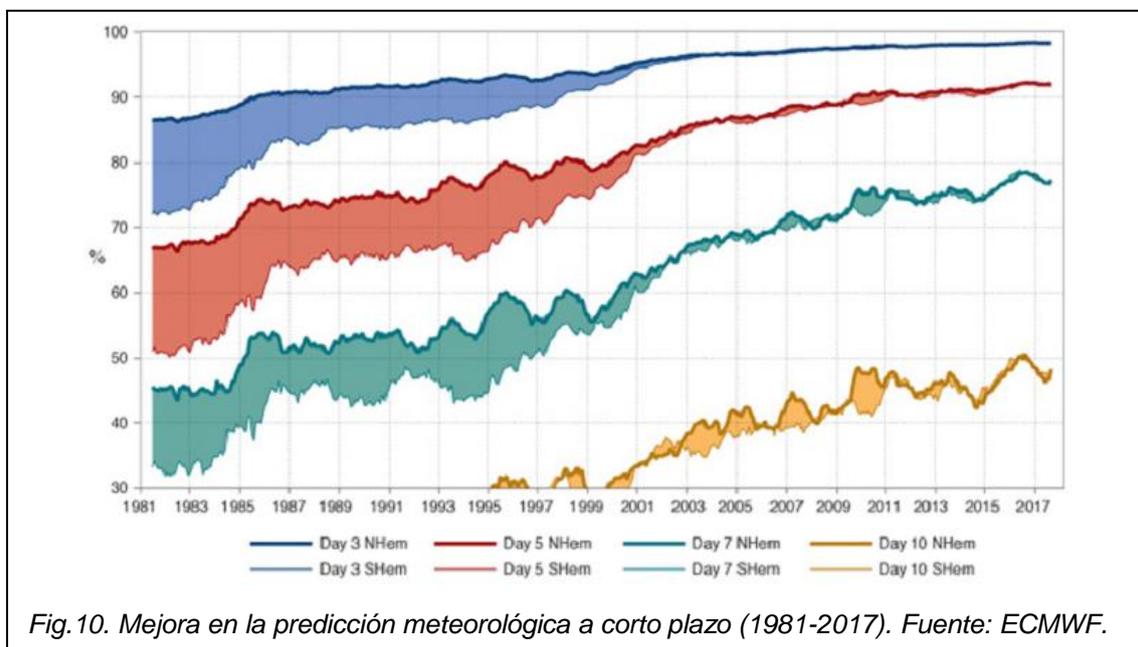


Fig. 10. Mejora en la predicción meteorológica a corto plazo (1981-2017). Fuente: ECMWF.

La mejora en el acierto de la predicción meteorológica es evidente. A pesar del habitual comentario coloquial sobre los fallos de pronóstico hoy en día con 24 horas de antelación el acierto en la predicción supera el 95%, sin ignorar que hay regiones del mundo de difícil pronóstico debido a su ubicación en relación con la circulación de vientos y sistemas de presión atmosférica y

sus singulares condiciones geográficas, como ocurre con el área del Mediterráneo. Lo mismo cabe decir de las mejoras en la modelización climática a medio y largo plazo. Desde los primeros informes del IPCC (1990) al último en vigor (2013-14) el afinamiento en las predicciones es evidente. Del 40% de fiabilidad estimada del primer informe del IPCC, al 85% del quinto Informe, vigente en la actualidad. Se estima que el próximo informe, el 6º informe del IPCC (2021-22), alcance una fiabilidad en su modelización del 90%.

En los próximos años, uno de los objetivos principales de las ciencias atmosféricas será dar respuesta a una aparente paradoja: la predicción meteorológica deberá mejorar en el largo plazo, es decir, los pronósticos a partir de 120 horas; y por su parte, los modelos climáticos tendrán que mejorar en el corto plazo, esto es, a una década vista para ofrecer proyecciones cada vez más realistas y espacialmente detalladas.

El conocimiento del tiempo y del clima terrestre va a seguir mejorando, sin duda. Pero siempre quedará ese punto de “magia”, incomprensible para el razonamiento humano que es esencia de la circulación del viento sobre la superficie terrestre y que sigue atrapando a aficionados e investigadores en la búsqueda de últimas respuestas sobre la dinámica de nuestra atmósfera.

#### Bibliografía:

- (1) CUADRAT, J. Mª y PITA LÓPEZ, Mª F. (1997) Climatología, Madrid, Ed. Cátedra, 496 pp.
- (2) BARRY, R.G. and CHORLEY, R. J. (2009): Atmosphere, Weather and Climate. (9ª ed.), London and New York, Ed. Routledge, 536 pp.
- (3) BURRIEL DE ORUETA, E. y OLCINA CANTOS, J. (2016) “Un período fundamental para la climatología española: el “descubrimiento” de la circulación atmosférica en altitud (1950 1980). Scripta Nova: revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Volumen XX. Número 525. 2016.
- (4) GIL OLCONA, A. y OLCINA CANTOS, J. (2017) Tratado de climatología. Alicante. Publicaciones de la Universidad de Alicante, 945 p.
- (5) Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2014): Climate Change 2013 and Climate Change 2014 (3 vols.) Disponible en: <http://www.ipcc.ch/> (Consultado: junio 2018.)
- (6) MARTÍN VIDE, J. y OLCINA CANTOS, J. (1996) Tiempos y climas mundiales. Climatología a través de mapas de tiempo e imágenes de satélite, Barcelona, Ed. Oikos-Tau, 308 pp.
- (7) MARTÍN VIDE, J. y OLCINA CANTOS, J. (2001) Climas y tiempos de España, Madrid, Alianza Editorial.
- (8) OLCINA CANTOS, J. (2014) “Referencias atmosféricas y avances para la ciencia climática en la obra de José de Acosta”. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales [En línea]. Barcelona: Universidad de Barcelona, vol. XVIII, nº 478. <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-478.htm>.
- (9) PÉDELABORDE, P. (1958) Introduction a l'étude scientifique du climat, Paris, 150 pp.
- (10) SANTOS BURGUETE, C. (ed.) (2018) Física del caos en la predicción meteorológica. Ed. AEMET. Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid, 1.116 p.
- (11) VIÑAS, J.M. (2016) El universo meteorológico. Un científico en las nubes. Ed. Materia- Descubrir la ciencia, Madrid, 145 p.

### **Jorge Olcina Cantos**

Catedrático de Análisis Geográfico Regional.

Laboratorio de Climatología, Universidad de Alicante.