

# Teoría de los Alisios durante la Ilustración (I)

Joaquín Pelkowski. Universidad de Frankfurt

## Introducción

El período histórico conocido como el Siglo de la Ilustración (o de las Luces), comprendido entre los primeros años del siglo XVIII y la Revolución francesa, y entendido como el movimiento cultural y político, pero también filosófico-científico que tuvo lugar en Europa y América en dicho período, estuvo marcado por una confianza ilimitada en el poder de la razón para abordar, entender y resolver los problemas de toda índole que acosaban al hombre de acción o preocupaban al intelectual. En el terreno de las ciencias, la razón —en su encarnación matemática— sería el instrumento que permitiría desvelar las leyes de la naturaleza.

La meteorología es una rama del saber que difícilmente se pliega al tipo de clasificaciones que suelen emplear los historiadores en otros campos. En todo caso, el optimismo racional al que acabamos de aludir, durante la Ilustración no condujo a ningún descubrimiento significativo en meteorología. Los **científicos** que contribuyeron a hacer de la Ilustración una de las empresas intelectuales más admirables de la historia, no dejaron de lamentar la insuficiencia de observaciones sobre las que apoyar sus teorías racionalizantes, y se puede afirmar que la meteorología teórica no avanzó gran cosa a lo largo del siglo XVIII. En el caso de los vientos alisios, se propuso una teoría que incluso hoy conserva su validez parcial, pero la teoría **oficial** que reinó durante la Ilustración había sido propuesta en 1686, y dependía de desarrollos previos que tuvieron lugar con la Revolución Científica. Por esta razón, no holgará resumir los desarrollos pertinentes que tuvieron lugar en ese siglo XVII.

Desde el Renacimiento, con el descubrimiento por parte de los marinos ibéricos de nuevas rutas al oriente y nuevas tierras de occidente que explotar, surgió la necesidad de dar cuenta de las noticias que los navegantes y viajeros europeos traían acerca de unos "vientos que en ciertas regiones corren y son como señores de ellas, sin sufrir competencia de sus contrarios" (Acosta, 1590). Desde los viajes en carabelas colombinas que se deslizaban sigilosamente hacia las paradisíacas tierras de ultramar, cundían en Europa las noticias de sistemas de vientos que prevalecían en vastas extensiones de los mares, "de suerte que la ida es en poca altura y siempre menos de veinte grados, que es ya dentro de los Trópicos, ...[donde] reinan siempre vientos de Oriente, y son buenos para ir de España a Indias Occidentales, porque es ir de Oriente a Poniente", como relata el Padre Joseph de Acosta (1539-1600) en su exquisita Historia moral y natural de Indias (1590), donde también nos informa que "en dos mil setecientas leguas siempre debajo, o no más lejos de diez o doce grados de la Línea, fue una nao de Lima a Manila, por febrero y marzo, que es cuando el sol anda más derecho encima, y en todo este espacio no hallaron calmas sino viento fresco, y así en dos meses hicieron tan gran viaje." Las nuevas alas no eran un mero capricho de los climas, "porque en todo lo que se

navega entre los Trópicos, es ordinario y regular viento el de la Brisa, lo cual por ser una de las maravillosas obras de la naturaleza, es bien se entienda de raíz cómo pasa" (Acosta, 1590). Entender "de raíz cómo pasa" el viento de la Brisa, y cómo se compadecía con la teoría copernicana, fue uno de los mayores desafíos científicos a partir de la Revolución Científica, que perduraría hasta bien entrado el siglo XIX.

Cabe preguntarnos cómo y cuándo el viento "de la Brisa" vino a llamarse viento **alisio**. Ignoro la respuesta. Es muy difícil, por no decir imposible, encontrar en los diccionarios comunes alguna información sobre la etimología de los vientos alisios. Y ello no sólo en castellano, sino también en francés e inglés. La voz alemana, **Passatwinde**, que proviene del holandés, significa vientos de tránsito o cruce. La expresión en inglés, **trade winds**, no tiene que ver, como a menudo se cree, con la actividad comercial que fomentaron (al poderse leer como "vientos del comercio"), sino que deriva de *tread*, que significa pisar, hacer sendero. Confirmación de esto se puede encontrar en una vieja obra (Barlow, 1715), en la que leemos la frase "winds which trade upon the ocean" (que se me permita traducir esta frase como "vientos que asendearan el océano"). Igualmente incierta es la etimología de **vents alizés**, voz francesa que vino a reemplazar la **Brisa** de nuestro jesuita. Al tratarse de vientos comparativamente regulares y constantes, de aspecto cartográfico alisado, cabe suponer que la etimología francesa aluda a "estar unido", ser "plano y liso". Nuestra autoridad es nuevamente un autor del pasado: "La etimología que se da a esta palabra es tan vaga y remota, que sería mejor no mencionarla. Algunos la hacen provenir de la palabra *lisiere*, en virtud de los límites constantes de estos vientos [en francés, *lisière* significa "límite, linde, lindero"]; otros, del latín *venti electi*, o vientos escogidos. Pero es también probable su derivación de la vieja palabra francesa, *aleser* [alésér: alisar], que significaba unír, pulir, aún en uso en este sentido en la artillería: *Aleser l'ame d'un canon* [Alisar el alma de un cañón]" (de la Coudrayes, 1786).

Tras estas observaciones sobre un término de azarosa filiación, será preciso recordar, aunque sea brevemente, los progresos más importantes de la neumática en el siglo XVII, que influyeron en las explicaciones que de los alisios se dieron en el setecientos. Para el resumen siguiente remito al útil escorzo de Solís (1991).

## El aire, su peso y su elasticidad

La **neumática**, arte creado en el período helenístico, fragua como ciencia en la segunda mitad del siglo XVII. Trata de la naturaleza, el peso, y la presión del aire, junto con los efectos que producen. Inicialmente se organiza en torno a dos innovaciones instrumentales sumamente importantes en el desarrollo de la meteorología, a saber, el tubo de Torricelli (un baroscopio) y la bomba de vacío. Hacia mediados del diecio-

cho, la neumática incluye el estudio del termómetro, los fenómenos térmicos y meteorológicos, el estudio y la naturaleza del sonido y hasta los tipos y las características de los vientos que, desde la clara definición antiaristotélica de Séneca, no son más que movimientos sensibles de aire. Pero antes de que Torricelli explicase el fenómeno del baroscopio mediante una hidrostática aérea, propugnando la idea de que nos hallamos en el fondo de un mar de aire, existía una tradición de experiencias neumáticas. Por otro lado, la influencia de la estática y la hidrostática de Arquímedes da lugar a que en el siglo XVII, gracias a Simon Stevin (1548-1620) y otros, se disponga de los conceptos de presión (entendida como fuerza sobre un área, sin importar la orientación de ésta) y equilibrio de fluidos, y de teoremas como el de que la presión en cierto nivel de un líquido es proporcional a la altura de la columna sobre ese nivel, independientemente del volumen o la forma. De este modo, existía un cuerpo de doctrina inmediatamente aplicable al aire tan pronto como éste se asimilase a un "licor".

Pero el paso más importante se dio con la bomba de vacío o máquina neumática, inventada por Otto von Guericke (1602-1686) y notablemente perfeccionada por un hábil ayudante de Robert Boyle (1627-1691), Robert Hooke (1635-1703). Con ella, por primera vez, se podía controlar la presión ejercida por el aire y, lo que es más importante, liberar al experimento torricelliano del peso de la atmósfera como variable independiente. Cuando se observa un barómetro bajo la campana de la bomba de aire, no se obtiene ya un equilibrio de los pesos de dos columnas, sino un equilibrio entre la fuerza de la gravedad (peso) del mercurio y la elasticidad del aire encerrado dentro de la bomba, que ejerce una presión medida justamente por la altura de la columna de mercurio que equilibra. En Inglaterra, Henry Power (1623-1668) y Richard Towneley (1629-1707) deducían de sus datos en 1661 que el volumen es inversamente proporcional a la presión externa. Más tarde, Boyle emprende el experimento llamado del sifón, y acatando juiciosamente los preceptos de Francis Bacon (1561-1626) de dedicarse a observar y tabular los hechos de la naturaleza, confecciona la primera tabla de la proporcionalidad directa entre el resorte (el elater o elasticus previamente introducido por Pecquet en 1651) del aire y su densidad. Así se establece que el resorte del aire (su resistencia a la compresión) es proporcional a su densidad y viceversa: en virtud de su dilatación, el aire pierde su fuerza elástica. Está implícito el hecho de que la temperatura se considera invariable en estos experimentos. Finalmente, Hooke repite y confirma ampliamente estos resultados, quedando definitivamente asentada la ley que hoy lleva el nombre de Boyle (a veces se atribuye sólo a Mariotte, especialmente en Francia, pero es común el de Boyle y Mariotte).

Mencionemos asimismo que en el siglo XVII se inventa el termómetro, para medir los distintos "grados de calor", a partir de unos termoscopios inspirados en aparatos como la eolípila de Herón de Alejandría (siglo 1 d. C.), prototipo de turbina de vapor que dio pábulo a muchas teorías sobre las causas de los vientos en los siglos XVII y XVIII. La máquina está descrita en la "Pneumática" de Herón, entonces recién reeditada, y consta de un globo que se hace girar alrededor de un pivote cuando se llena de vapor de agua, al cual expulsa por dos tubos de escape en direcciones opuestas. Descartes (1596-1650), por ejemplo, basa sus explicaciones analógicas de los

vientos naturales en ese antiguo aparato (Descartes, 1637): "De la misma manera que vemos que de esas bolas llamadas eolípilas, un poco de agua que se exhala en forma de vapor hace un viento bastante grande y bastante fuerte...Y porque ese viento artificial nos puede ayudar mucho a entender cuáles son los naturales, será bueno que lo explique..." Todavía en el siglo **ilustrado** encontramos explicaciones basadas en la analogía cartesiana: "Nosotros tenemos una máquina que se llama Eolípila, la qual imita muy al vivo un viento muy recio..." (de Almeida, 1792).

Resulta asaz curioso que la ley de Boyle no haya sido extendida a los casos en que había calentamiento de los gases para establecer la relación de simple apariencia que conocemos como ley de los gases ideales. A pesar de que se realizaron experimentos de calentamiento a volumen o presión constantes, notablemente por Guillaume Amontons (1663-1705) en vísperas del siglo XVIII, quien descubre la proporcionalidad entre la presión y la temperatura del gas, no se establece aquella ley sino hasta un siglo más tarde, si bien Leonhard Euler (1707-1783) la utiliza a partir de 1757, pero sin el mismo sustento empírico que la de Boyle. Barrunto que ese hecho curioso se debe a las dificultades de cuantificar "el grado de calor" de un cuerpo, que no fueron salvadas sino hasta el siglo XIX. En todo caso, se puede observar que a lo largo del período que nos ocupa, la falta de una clara relación (cuantitativa) entre el calor (temperatura), la presión y la densidad del aire, no dejara de confundir a los teorizadores del origen de los vientos, a la hora de decidir si un calentamiento acompañado de un enrarecimiento (disminución de densidad) entrañaba una menor o mayor presión, en comparación con aire más frío y por ende más denso. Como veremos más adelante, de tal confusión resultaron algunas conclusiones falaces.

En suma, se asiste en el siglo XVII al gradual rechazo de la filosofía aristotélica y a la instauración de una nueva metodología, más o menos firmemente anclada en la experimentación. En anemología, o teoría de los vientos, ese proceso tiene lugar a gatas y regañadientes, a pesar de que participan en su desarrollo los artífices de la Revolución Científica, así como algunos escritores menos conocidos: Francis Bacon nos lega la primera obra enteramente dedicada a los vientos, en su "Historia naturalis et experimentalis de ventis", originalmente publicada en 1622 bajo otro título; Galileo Galilei (1564-1642), en su ameno "Dialogo supra i due massimi sistemi del mondo" ptolemaico e copernicano (1632); René Descartes, en su ya citado "Discours de la méthode" (1637), que incluye su risible anemología en el apéndice titulado "Les météores"; Bernhard Varenius (1622-1650), en su sistemática y asombrosamente exitosa "Geographia Generalis, in qua affectiones generales Telluris explicantur" (1650), varias veces traducida en el siglo siguiente; Ralph Bohun, en el ignorado "A Discourse Concerning the Origine and Properties of Wind" (1671); Edme Mariotte (1620?-1684), en su juiciosa hidrodinámica, "Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides", redactado en 1684 y publicado póstumamente en 1686; Edmond Halley (1656-1742), en su clásico "An historical account of the Trade Winds, and Monsoons, observable in the Seas between and near the Tropicks, with an attempt to assign the Phisical cause to the said Winds" (1686)". Al ser esta última obra de primera importancia para las explicaciones de los alisios en el dieciocho, hemos de prestarle mayor atención.

## La teoría de Halley

La explicación de Halley se inserta en un marco ya plenamente copernicano. Tras describir lo que se sabía de los alisios y los monzones, en parte basándose en propias observaciones realizadas durante su estadía en la zona tórrida, representándolas en lo que es el primer mapa de vientos (ver la fig. 1), Halley plantea los siguientes interrogantes (Halley,1686): «En la historia anterior están contenidos varios problemas que bien merecen la consideración de nuestros más agudos naturalistas, tanto por la constancia del efecto como por la inmensa extensión del mismo, estando involucrada casi la mitad de la superficie del globo. Los principales problemas son: 1) ¿Por qué estos vientos son perpetuamente del este en el Atlántico y el mar Etiópico, como también lo son en el océano Pacífico, entre las latitudes de 30 grados norte y sur? 2) ¿Por qué no se extienden dichos vientos más allá de los 30 grados? 3) ¿Por qué ha de haber un viento constante del suroeste sobre y cerca de la costa de Guinea? 4) ¿Por qué, en la parte del océano Índico donde los vientos, que durante la mitad del año coinciden con los de los otros dos océanos, han de cambiar durante la otra mitad, para soplar de los puntos opuestos, mientras que en las partes australes de aquel océano obedecen a la regla general de ser vientos perpetuos alrededor del sureste? 5) ¿Por qué ha de ser siempre verdadero que estos vientos alisios, al norte y sur del ecuador, se inclinan hacia el noreste y sureste, respectivamente? 6) ¿Por qué en los mares de la China ha de haber semejante inclinación, del este hacia el norte, más que en las otras partes? Y muchos más problemas, más fácil de proponer que de contestar.».

Halley en seguida declara: «Pero para que no parezca que esté proponiendo a otros dificultades que no haya creído dignas de mi propio tiempo y esfuerzos, tómese aquí el resultado de un serio intento de dar razón de los fenómenos susodichos, sobre los cuales hice reflexiones que, aunque no sea capaz de dar cuenta de todos los detalles, espero que no sean juzgadas totalmente perdidas por los curiosos en pesquisas naturales.» Acto continuo pasa a exponer las ideas reinantes, para luego rechazarlas como insatisfactorias: «Viento se define lo más apropiadamente como el flujo o corriente del aire, y donde tal corriente es perpetua y fija en su curso, es preciso que proceda de una causa permanente, no intermitente. Por eso algunos se han inclinado por la propuesta de que a causa de la rotación diurna de la Tierra sobre su eje, el globo girando hacia el este, las partículas sueltas y fluidas del aire, siendo sumamente ligeras, se quedan atrás, de manera que, respecto de la superficie de la Tierra, se mueven hacia el oeste, ocasionando un viento constante del levante. Esta opinión parece confirmada, puesto que estos vientos se encuentran sólo cerca de la equinoccial, en aquellos paralelos de latitud donde el movimiento diurno es más raudo; y yo asentiría de buena gana, si en el Atlántico las calmas constantes, cerca del ecuador, los vientos del oeste cerca de la costa de Guinea y los monzones periódicos del oeste en el mar Índico bajo el ecuador, no declararan la insuficiencia de aquella hipótesis. Además, el aire, que está sujeto a la Tierra por el principio de la gravedad, adquiriría el mismo grado de velocidad que la superficie de la Tierra en movimiento, tanto respecto de la rotación diurna como respecto de la anual, en torno al Sol, que es cerca de treinta veces más veloz.» Continúa proponiendo

su propia teoría: «Hace falta, pues, suplir alguna otra causa, capaz de producir tal efecto constante, sin estar sujeta a las mismas objeciones, pero conforme a las propiedades conocidas de los elementos aire y agua, y a las leyes de los movimientos de los cuerpos fluidos. Tal causa es, según lo concibo yo, la acción de los rayos del sol sobre el aire y el agua, a medida que pasa diariamente sobre los océanos, en combinación con la naturaleza del suelo y la situación de los continentes adyacentes: digo, pues, primero, que de acuerdo con las leyes de la Estática, el aire, que está menos enrarecido o dilatado por el calor, siendo por consiguiente más pesado, se pone en movimiento hacia aquellas partes más enrarecidas y menos pesadas, para realizar el equilibrio; y segundo, que el sol, deslizándose continuamente hacia donde tiende también el aire, lo acarrea hacia el oeste, en virtud del enrarecimiento efectuado por el máximo calor meridiano, y por consiguiente, la tendencia del cuerpo entero del aire inferior es en ese sentido. De tal manera se forma un viento general del este, que se imprime a todo el aire de un vasto océano, con las partes impeliéndose unas a otras, para mantener el movimiento hasta el próximo regreso del sol, recuperándose entonces tanto movimiento como se había perdido, y perpetuando de ese modo el viento del este.

Del mismo principio se sigue que este viento del este ha de soplar, al norte del ecuador, del noreste, y en latitudes australes, del sureste; pues cerca de la línea, el aire está mucho más enrarecido que a una mayor distancia de ella, y el sol, que se encuentra dos veces al año en el cenit, en ningún momento se aleja más de 23.5 grados de latitud, donde el calor, siendo proporcional al seno del ángulo de incidencia, no difiere mucho del del rayo perpendicular; mientras que bajo los trópicos, aunque el sol se mantenga largamente aplomado, puede estar alejado de 47 grados, de donde resulta una especie de invierno, durante el cual el aire se enfría hasta tal punto que el calor estival no lo puede calentar en un mismo grado como ocurre con el aire bajo el ecuador. Por lo tanto, el aire al norte y al sur, más denso que en el centro, ha de tender de ambos lados hacia el ecuador: este movimiento del viento, combinado con el anterior, del este, dilucida todos los fenómenos de los vientos alisios, que indudablemente soplarían durante todo el año, si toda la superficie del globo constara de mar, como sabemos que lo hacen en los océanos Atlántico y Etiópico.»

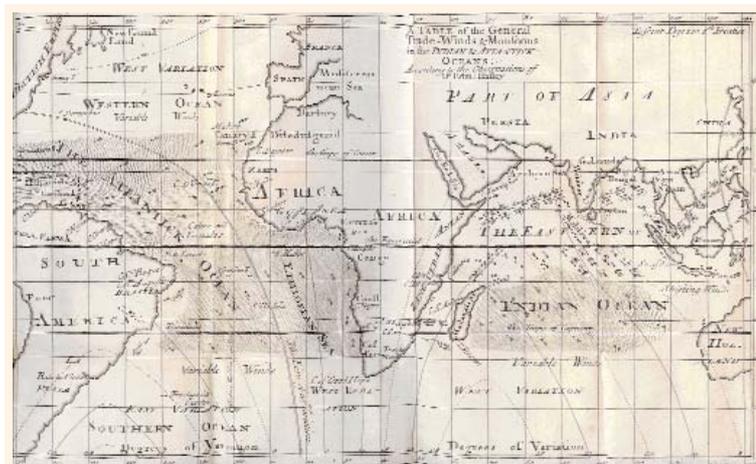


Figura 1. Mapa de vientos de Barlow (1715) según las observaciones de Halley.

Halley remata su ensayo reconociendo que no podía explicar todos los rasgos de los vientos que muestra su mapa de vientos (ver fig. 1), como son, por ejemplo, el límite de la zona de los alisios y el distinto comportamiento de los monzones en las mismas latitudes. Pero su explicación no será seriamente impugnada durante mucho tiempo, no porque fuera irrefutable, sino acaso por haber sido expuesta por un científico que gozaba de gran prestigio en su época, o, como escribirá Kant en su anemología, simplemente por falta de una mejor.

### De Halley a Sarrabat

La explicación de Halley se perpetúa en las décadas siguientes, constituyendo aun hoy una componente en la explicación de los alisios. Varios autores posteriores a Halley la incorporan en sus exposiciones sobre los vientos, y una prueba de su ubicuidad es la ya citada obra sobre geografía general de Varenio, la cual influyó en muchos autores del siglo siguiente, además de haber sido editada por el mismo Isaac Newton en 1671 y por James Jurin en 1711, quien la complementó actualizándola. Esta versión latina es vertida al inglés en 1733/34, al holandés en 1750, y al francés en 1755. Merece la pena reproducir algunos pasajes de su obra (me baso en la versión francesa). Varenio alega *"varias causas de los vientos; puesto que el viento no es más que un impulso fuerte del aire, todo lo que contribuye a este impulso, es causa de los vientos."* Apoyándose probablemente en Francis Bacon, da una descripción típica del seiscientos: *"La causa general y principal es el sol mismo, el cual, mediante sus rayos de fuego, enrarece y atenúa el aire, sobre todo el que se encuentra debajo de él. El aire enrarecido ocupa un mayor espacio, lo que hace que el aire empuja hacia adelante el aire contiguo; y el sol, teniendo un curso circular del este al oeste, hace que la presión se ejerza hacia el oeste, como parece ser el caso en la mayoría de los lugares de la zona tórrida y en todos los alrededores, donde reina continuamente sobre el mar un viento del este; el aire enrarecido presiona hacia el oeste dentro de los trópicos. Existe, efectivamente, una presión por todos lados; pero el aire apenas es admitido en los otros puntos porque la presión no es tan grande como del lado de oeste, dado que el sol se mueve hacia ese lado."*

Menciona entonces siete causas y continúa: *"Será muy ventajoso considerar la eolípila para entender bien estas causas de los vientos..."* En la Proposición XIV se pregunta: *"¿Por qué los vientos del este son más frecuentes que los del oeste?"* Su respuesta nos trae a mientes la confusión a que aludíamos anteriormente: *"Se ve una razón evidente en la décima Proposición, donde dije que el sol era la principal causa que enrarece al aire del este hacia el oeste; por consiguiente, el aire es más presionado del lado del oeste. Este movimiento no puede ser impedido, a no ser por una gran cantidad de exhalaciones o nubes en la parte oeste, lo cual no es frecuente."* En 1650 era necesario aclarar que *"las gentes de mar llaman viento general a aquel que sopla al mismo tiempo en varios lugares, en una gran extensión de países y durante casi todo el año"*, y Varenio busca satisfacer la curiosidad del lector informándole que *"los naturalistas señalan tres causas de este viento general (puesto que los antiguos no tenían ningún conocimiento ni siquiera de la zona tórrida). Algunos piensan que el movimiento del sol del este al oeste es la*

*causa, porque enrarece el aire por donde pasa, y que esta rarefacción sigue al sol que empuja el aire delante de sí. Otros, es decir, los que suponen que los cielos son inmóviles y que la Tierra gira, son del parecer que el viento general viene del movimiento de la Tierra del oeste al este, y que el aire gira con ella, pero no tan rápido como nosotros; y por consiguiente, dicen que vamos contra el aire, o el aire contra nosotros del este al oeste. La tercera causa, nueva, fue imaginada por Descartes (...) donde trata de mostrar que ese movimiento del aire es causado por la luna, también como las mareas: pero como es preciso, para comprender su opinión, conocer sus otras suposiciones, no entraremos aquí en ningún detalle al respecto... La primera causa es la que más nos satisface; la segunda no nos parece ser admisible, porque varios copernicanos la han rechazado, y no podemos aducir ninguna razón de por qué no soplaría sino entre los trópicos, y no más allá."*

Del largo suplemento de Jurin me limito a citar el siguiente pasaje: *"Se define propiamente el viento como corriente o movimiento del aire, que por ser constante o perpetuo ha de tener una causa constante o permanente. Algunos creen encontrar esta causa en la revolución anual de la Tierra alrededor de su eje. Podríamos adoptar esta razón, si no fuera que cerca del ecuador encontramos unas calmas casi continuas en el mar Atlántico, y bajo el ecuador vientos del oeste sobre la costa de Guinea, y también vientos reglados del oeste en el océano Índico. Por cierto, el aire siendo un cuerpo que pesa y gravita, adquiriría la misma velocidad que la Tierra, y como gira con ella en su movimiento anual, parece tener que hacerlo con mayor razón en su movimiento diurno, que no es de más de una treintésima tan rauda como el otro. Hay que buscar, pues, otra causa."* Lo que sigue es una reproducción casi literal del argumento de Halley.

Pasando ahora ya al siglo XVIII, vale comenzar señalando un tratado teórico y definitivo sobre **aerometría**, publicado en 1709 por el leibniziano Christian Wolff (1679-1754), en el que expone de manera axiomática y sistemática los principios científicos de la pneumática del siglo anterior. Su compatriota Guericke es mencionado con grandes elogios, así como Hooke, Papin y Newton, quienes aprovecharon los famosos experimentos guerickeanos para no dejar duda alguna acerca del trabajo (mecánico) que puede realizarse con el aire, según su mayor o menor presión. También discute la conexión de la disciplina con la teoría de los vientos, y los efectos del calor solar en la producción de éstos. Su libro *Aerometria elementa*, sin embargo, no parece haber influido mucho en las obras que discutiremos a continuación. Por otro lado, las ubérrimas obras de este autor, divulgadas como manuales en varias universidades alemanas, no justifican ignorarlas del todo, por lo que citaremos un pasaje típico de uno de sus prolivos libros: *"Cuando el aire se enfría, se encoge y por eso mismo pierde su fuerza de expansión. Por lo tanto, el aire vecino que no sufre las mismas variaciones ha de moverse hacia aquel lugar, causando así un viento. De esta manera se produce el viento en las orillas de los mares y las grandes lagunas, que se siente especialmente en las horas vespertinas, al enfriarse el aire. Es bien conocido que el agua no se caldea tanto como la tierra, y por ello el aire sobre aquél no puede estar ni subsistir más cálido que el aire sobre ésta. Por consiguiente, cuando en la tarde el sol abandona la tierra o por lo menos ya no brilla con tanto calor y se enfría el aire más sobre el agua que sobre*

la tierra, se forma un pequeño viento o vientecillo fresco" (Wolff, 1723). No es éste el único ejemplo de un empleo incorrecto de la dilatabilidad del aire con el calor en la explicación de las brisas costeras, reflejándose una vez más la confusión que reinaba acerca de los efectos de calentamiento sobre la presión y densidad del aire.

En el primer tercio de siglo XVIII, son muy contados los aportes anteriores al del **gran renovador** de la teoría de los vientos, George Hadley (1685-1758), cuyo menudo ensayo de 1735 marca una nueva etapa en la evolución de conceptos hacia la explicación de los alisios, representando efectivamente el primer jalón de lo que se llamará meteorología dinámica en el siglo XIX. Desafortunadamente, su concisa exposición no llamó la atención de sus contemporáneos. De las escasas contribuciones anteriores sólo merece mención la del jesuita francés Nicolas Sarrabat (1698-1737), por haber sido premiada por la Academia de Bordeaux en 1730. En su *Dissertation sur les causes et les variations des vents*, Sarrabat basa la explicación de los vientos alisios en una analogía con un experimento que él mismo realizó. Sobre un estanque de un pie de diámetro y medio pie de profundidad, lleno de agua cubierta de briznas de paja, mueve circularmente un pedazo de hierro candente, del tamaño de una nuez (ovalada), imitando así el movimiento diurno del Sol alrededor de la Tierra: "Apenas el hierro candente hizo impresión sobre el agua, observé que las briznas más cercanas se alejaban describiendo espirales, y pronto las más alejadas hacían un tanto. En menos de un cuarto de hora estaban acumuladas al borde del recipiente." De sus experimentos saca la conclusión de que el movimiento debido a la acción del hierro candente es impulsar las pajitas en línea recta hacia fuera desde el centro de acción perpendicular, debiéndose el movimiento en espiral a los bordes circulares del estanque. Tras observar la ebullición causada por una caída accidental de la férrea nuez, que de inmediato le recordó los movimientos de legumbres cocidas en agua, concluye: "El agua, calentada a plomo por el hierro, se eleva, enrareciéndose, y las partes más elevadas, arrastradas por su propio peso, o empujadas por aquellas que se elevan a su vez, caen de nuevo por todos los lados y, mediante un movimiento circular van a reemplazar por debajo las que siguen siendo atraídas por el hierro desde arriba." Con este experimento en mente, explica: "Algo semejante debe de ocurrir en la atmósfera calentada por el sol en donde actúa perpendicularmente: el aire tiene que elevarse, y de ahí, por una pendiente natural, ha de derramarse sobre el que tiene su superficie a un nivel inferior, mientras que por debajo tiene lugar un reflujó contrario que, por una circulación necesaria, viene a reemplazar el aire que el sol no deja de elevar." Acto continuo enuncia el fundamento empírico de su teoría: "He ahí pues los tres movimientos que el sol imprime a la atmósfera: movimiento de pulsión en virtud del cual sus rayos empujan y expulsan el aire del centro a la circunferencia; movimiento de caída mediante el cual el aire, más exaltado debajo del sol que en las otras partes, desciende derramándose sobre el aire más alejado; movimiento de circulación que fuerza al aire a devolverse por debajo desde los lugares más alejados hacia donde el sol actúa más directamente. A este último lo llamaré también movimiento de atracción. Estos no son más que principios, y es hora de regresar a su aplicación."

Refiriéndose a una figura (ver la fig. 2), declara que "el aire

empujado por la fuerza de pulsión que hemos reconocido en los rayos de este astro [el Sol], imita su movimiento, yendo como él de Oriente a Occidente y formando un viento del Este muy natural y muy marcado". Tras considerar que en CH, donde está amaneciendo, se forma el rocío, dirige su atención a la parte ABFE de la figura, con el sol de puesta en BF, y declara que "el movimiento de la atmósfera es mucho más compuesto: para descubrirlo, hay que considerar que el Sol cenital en A

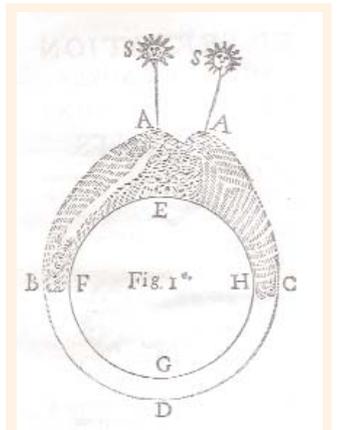


Fig. 2 (Sarrabat, 1730)

dilata el aire más que en todas las otras partes, elevándolo por consiguiente por encima del resto de la atmósfera; de allí ese aire tiende a caer de un lado y otro; pero como el Sol siempre progresa hacia el Occidente, antes de que las partes de aire hayan podido caer hacia ese lado, por ejemplo hacia A..., la intumescencia es transportada al punto A [la A derecha] y su descenso se ve interrumpido; de modo que la caída del aire elevado en A no puede tener lugar sino hacia B, es decir, del lado de Oriente: este aire exterior, derramándose por la parte superior, sobrecarga toda esta parte de la atmósfera, forzándola a moverse por debajo en sentido contrario, es decir, de Oriente a Occidente, para venir a reemplazar al que el Sol no deja de elevar." Enseguida concluye que en la parte ABFE "reinan dos vientos contrarios, uno en la región superior, de Occidente a Oriente, el otro en las regiones inferiores, de Oriente a Occidente." Con benevolencia anacrónica podríamos ver en este esquema una prefiguración de las celdas de Walker (y las corrientes en chorro de las latitudes bajas). Sarrabat, antes de extenderse sobre las variaciones debidas a la declinación del Sol, resume la formación de los alisios así: "Reina en el ecuador, pues, en presencia del Sol un viento de Oriente que se hace sentir sobre la superficie de la Tierra en todo el semicírculo iluminado FEH; este viento es causado por impulsión, de E a H, y por atracción, desde F hasta E. Un viento similar tiene que reinar también sobre todo el semicírculo inferior FGH, pese a la ausencia del Sol. La razón es que el Sol, en su marcha, siempre sigue empujando el aire en una misma dirección, dándole una impresión que subsiste incluso cuando se ha retirado. Es cierto que este viento tiene que andar debilitándose desde la puesta de este astro hasta que despunte el día; y es un hecho apuntado por los observadores más exactos el que los vientos alisios que reinan bajo la línea se debilitan durante la noche."

Aunque en Sarrabat hay innovación, su explicación no supera en esencia a la de Halley, representando una inteligente matización basada en una analogía con su experimento de laboratorio. En cambio, Hadley (1735) introduce un aspecto dinámico novedoso, justamente reconocido como tal en las exposiciones históricas de nuestra época. Su aporte es tan conocido que no hace falta resumir lo que en realidad ya no es más que un resumen de su propio razonamiento (Hadley, 1735). Creo que podemos remitir al lector de esta historia a su magistral artículo, varias veces reimpresso, además de haber sido traducido, entre otros idiomas, al castellano (Hadley, 2000). Así podemos aprovechar el espacio para dar a conocer

las teorías menos recordadas o incluso enteramente ignoradas por los historiadores actuales.

### Un segundo concurso sobre las causas de los vientos

Para ambientar las explicaciones propuestas tras el precolo intento de Hadley en 1735, con el cual cerramos la primera parte de esta sucinta historia, consultemos sobre los alisios un famoso manual de la época, de carácter pedagógico. Altamente influyente y muy citado durante la Ilustración, con dos ediciones en su versión francesa, el *Essai de physique* del reputado físico experimental holandés, Pieter van Musschenbroek (1692-1761), es una útil compilación, si bien un tanto farragosa, de descripciones de fenómenos naturales, incluyendo opiniones y explicaciones sobre sus causas. Las secciones sobre los vientos da suficiente abasto para adornar el fondo sobre el cual se habrán de juzgar las aportaciones posteriores. De las múltiples causas que Musschenbroek se complace en enumerar, no vamos a discutir sino las que interesan la explicación de los alisios: *“Los vientos generales que soplan entre ambos trópicos o muy poco más allá.”* Enumera los mares donde soplan y agrega: *“Los vientos que reinan en las otras regiones de la Tierra, o son vientos periódicos o son vientos variables. Hay vientos periódicos que reinan en el océano Índico y los hay en la Grecia; pero los vientos variables reinan fuera de los trópicos.”* Añade entonces que nadie había escrito mejor sobre los vientos generales que Halley y el bucanero Dampier, quienes los habían observado detenidamente en sus viajes marítimos, y que por ello podían servirle de guías. Nos invita a contemplar un mapa (basado en el de Halley), describiéndonos sus características, tras lo cual pasa a exponer las causas de tales vientos generales. Cree o supone con Halley que la causa principal es el Sol. Este, nos dice, lanza sus rayos perpendicularmente sobre el ecuador cual dardos, calentando al extremo el aire allí ubicado, *“dándole más fuerza”*, y haciendo que se dilate hacia todos lados y se eleve por encima del resto de la atmósfera, menos cálida, de modo que ha de derramarse lateralmente hacia todas partes de acuerdo con *“las leyes del peso de los fluidos, al igual que un agua en ebullición que sale de su fuente, se difunde hacia todos lados”*. En consecuencia, *“la columna de aire calentada se hace continuamente más corta y ligera, de manera que no puede resistir la presión de las columnas laterales, que van a acudir hacia el aire calentado del centro, al estar compuestas de un aire más denso y pesado, además de haber aumentado de peso por el aire que recibieron ... por la parte superior.”* Destaca además que gracias a la fuerza centrífuga, la atmósfera es de forma ovalada, más alta sobre el ecuador y más chata hacia los polos, forma que contribuye a que el aire fluya en altura desde aquél hacia éstos. Y luego explica con un toque de sofistería: *“Mientras ocurre todo esto, el sol avanza de oriente a occidente, o la Tierra gira de occidente a oriente, lo cual es la misma cosa en este caso, puesto que aquí sólo hacemos caso al aire que se calienta sucesivamente. Habrá, pues, en primer lugar, gracias al paso rápido del sol, una extensión de aire de cierta longitud, en la cual el aire ofrecerá menos resistencia a oriente y occidente que el aire que presiona de los lados norte y sur; y como esta porción del aire, por encima de la cual el sol acaba de pasar, se encuentra más*

*cálida que la que se halla directamente debajo del sol, la columna de aire situada un poco más al oriente estará más elevada y enrarecida: se moverá, pues, por abajo en este lugar con la mayor fuerza, sobre todo hacia el este, y mucho más hacia ese punto que hacia el oeste, ya que las columnas más occidentales se elevan al calentarse, mientras que las más orientales descienden a medida que se enfrían; así, las columnas más orientales presionarán contra el oeste gracias al aire superior que pasa por encima, produciendo por consiguiente un viento del este. Pero el aire lateral del norte y del sur también viene a presionar contra el aire más enrarecido; por consiguiente, la parte septentrional presionará hacia el sur, encontrándose con el aire que fluye del este hacia oeste: estas dos direcciones, que llegan [sic!] al mismo tiempo, han de impartir al aire un movimiento compuesto, en una dirección que viene del noreste, de manera que debería soplar en ese lugar un viento del noreste.”* De la misma manera explica, por simetría, los alisios del sureste, y concluye: *“Vemos que estos dos vientos, que se observan efectivamente, son producidos por la forma oval de la atmósfera y por la acción del Sol sobre el aire, que consiste en calentarlo.”* Menciona la regularidad con que soplan los alisios, salvo sobre tierras cubiertas de bosques o en tierras montañosas, y finalmente alude a las observaciones de alguien en Cayenna, para confirmar su prejuicio de alisios puramente diurnos, que merman de noche.

Mencionemos que Musschenbroek explica correctamente las brisas de mar (en la costas del África occidental y en Holanda), mediante el ascenso y desparrame (en altura) del aire, haciendo que el aire inferior del mar, más frío y más pesado, se precipite hacia tierra firme. Pero falla también a la hora de explicar el terral: *“El agua se enfría en primer lugar [después de la puesta del sol], y luego lo hace la tierra, así que el aire marino también se enfría más que el aire que cubre la tierra: en ese momento el aire que flota sobre la tierra se dilata y se arroja hacia el mar, produciendo de esta manera un viento de tierra.”* Kant, quien redescubriría el simple principio de Hadley, yerra con Musschenbroek, a quien leyó, en la explicación de las brisas costeras.

Es fácil imaginar a un geómetra de la época, acostumbrado a la disciplina racional que le proporcionaban las nuevas matemáticas, rechazar toda la charlatanería sobre los vientos y acariciar la esperanza de una explicación a imagen y semejanza de las que se estaban elaborando con la asistencia de una ley como la de la gravitación de Newton, por ejemplo en la teoría de las mareas. Es así que se me antoja que el incomparable Leonhard Euler (1707-1783) se haya propuesto desafiar a los geómetras y físicos del momento, convocándolos a ofrecer una explicación más *“racional”* de los vientos generales sobre la Tierra. Durante la Ilustración europea, distintas academias estimulaban la elucidación de problemas surgidos en teoría o en la práctica mediante convocatorias de premios, como ya lo vimos en el caso de la Academia de Bordeaux, que había premiado en 1730 la disertación sobre los vientos de Sarrabat. Un segundo concurso, cuyo tema indudablemente llevaba la firma del genial Euler, fue convocado para el año de 1746 por la recién reorganizada Academia de Berlín. En su propuesta, la Academia prusiana precisaba que los vientos eran producidos por tantas causas, y tan variables, *“que los filósofos apenas debieran de halagarse de poder deducir su teoría con un grado de perfección que los ponga en condicio-*

nes de determinar los vientos, y sobre todo en países bastante alejados del ecuador y de los trópicos" (Kleinert, 1989). Dada la complejidad del tema, la Academia no esperaba una solución completa. Por lo tanto, propuso simplificaciones que permitieran abordar el problema a través del análisis matemático: "Si se supusiera que la Tierra estuviera rodeada por todos lados de un océano...el movimiento de los vientos estaría determinado probablemente por sólo tres causas, a saber, el movimiento de la Tierra, la fuerza de la Luna, y la actividad del Sol." Éstas no son otras que las tres causas generales enunciadas en su obra póstuma por Edme Mariotte en 1686.

Según Kleinert, por "actividad del Sol" debía entenderse "atracción debida al Sol", y la Academia excluyó expresamente los efectos por calentamiento solar, agregando que apenas se aclarase la cuestión propuesta, quedaría por investigar "cuál modificación podrían causar el calor y la altura de las tierras en el movimiento del aire". Previendo las grandes dificultades de tal investigación, la Academia estipula que "todo lo que se puede exigir razonablemente en esto es que un filósofo indique aproximadamente el orden que los vientos deberían seguir si se supone el caso susodicho" (Kleinert, 1989).

El reto lanzado por Euler, el "príncipe de las matemáticas" del momento, no parece haber interesado demasiado a los geómetras, si exceptuamos a Jean le Rond d'Alembert (1717-1783), quien, tras haber recibido el prospecto del concurso, de inmediato puso sus manos a la obra, terminando una enjundiosa disertación en cinco meses (aparentemente usando el tema más como pretexto para desarrollar sus habilidades analíticas en la nascente teoría de campos, que para comprender las causas verdaderas de los alisios). Su memoria tardó en llegar a Berlín (Kleinert, 1989), y antes de que lo hiciera, cerca de un mes antes de vencerse el plazo, parece que Euler estuviera preocupado por la baja calidad de las primeras dos entregas, lo que lo indujo a escribirle a su amigo Daniel Bernoulli (1700-1782), hijo de su maestro Johann Bernoulli (1667-1748), instándolo a participar en el concurso, pese a que aquél le había escrito en septiembre de 1746 que no había encontrado nada que mereciera su atención (Mikhailov, 2002). Al verse rogado, Daniel, para no desilusionarlo, buscó complacer a su amigo, componiendo en pocos días una memoria, y confesando que "un trabajo tan precipitado no es digno ni siquiera de mí, ni mucho menos de la Academia; por eso ruego que no se haga mención de mi nombre; sin embargo, puede ser que contenga algunas reflexiones que merezcan la aprobación de la Academia. [...] He señalado diversas cosas sin demostración, debido al plazo tan corto y muchos otros oficios. [...] Esta vez necesito su indulgencia en todo sentido."

Los autores de las entregas debían permanecer anónimos. Fuera de d'Alembert, a quien había reconocido "ex ungue leonem", y de Daniel Bernoulli, Euler aparentemente conocía la autoría de otros concursantes (Pelkowski, 2005). De las once memorias entregadas, la Comisión de la Academia, presidida por Euler, unánimemente adjudicó el premio de 50 ducados al autor de la obra identificada por la divisa: "Haec ego de ventis: dum ventorum ocyor alis Palantes pellit populos Fridericus, et orbi, Insignis Lauro, ramum praetendit Olivae" (Esto os digo sobre el viento: Más veloz que en alas del viento, Federico triunfa sobre los pueblos errantes, y al orbe, ostentando su laurel, la rama del olivo presenta). Con la excepción de las tres mejores disertaciones, las demás fueron seguramente destrui-

das, como lo pedían los estatutos. Euler (1996), en un informe a la Academia sobre la memoria coronada, se queja de la mayoría de los autores por no haber entendido correctamente la pregunta, y del resto dice que la habían tratado con negligencia. El ensayo ganador fue publicado por la Academia en 1747, junto con las otras dos memorias que habían recibido el accesit (la aprobación de la Academia). El libro auspiciado por la Academia contiene estas tres contribuciones tal como participaron en el certamen, una en latín, la siguiente en francés, y la tercera en alemán. Estas dos últimas aparecen anónimas, pero con el tiempo se han identificado a sus autores: Daniel Bernoulli y Christlob Mylius (1722-1752). Con la primera, serán el objeto de la siguiente sección.

## Referencias

- Acosta, J. de.** 1985: Historia natural y moral de las Indias. (Edición original, Sevilla 1590.) Fondo de Cultura Económica, México.
- Bacon, F.** 1803: The Works of Francis Bacon. Vol. 12. M. Jones, Paternoster-Row, Londres.
- Barlow, E.,** 1715: Meteorological Essays Concerning the Springs, Generation of Rain, and Production of Wind. John Hooke and T.C., Londres.
- Bernoulli, D.** 1747: Recherches physiques et mathématiques sur la Theorie des vents réglés Ver d'Alembert (1747), pp. 137-176. Reimpreso en 2002.
- Bernoulli, D.** 2002: Die Werke von Daniel Bernoulli. Band 5. Hydrodynamik II. (Las obras de Daniel Bernoulli. Volumen 5. Hidrodinámica.) Editor: G. K. Mikhailov. Birkhäuser Verlag, Basilea.
- Coudrayes, De la,** 1786: Théorie des vents. De Cambonneau, Fontenay.
- d'Alembert, Jean Le Rond.** 1747: Réflexions sur la cause générale des vents. Haude & Spener, Berlín.
- De Almeida, T.,** 1792: Recreación filosófica, o diálogo sobre la filosofía natural, etc. (Traducción del portugués, 2ª edición). Imprenta Real, Madrid.
- Descartes, R.,** 1637: Discours de la méthode plus La dioptrique, les météores et la géométrie. Reimpresión en 1987, Fayard, París.
- Euler, L.,** 1986: Correspondance. Briefwechsel. Opera Omnia, Series quarta, Vol. 6. Birkhäuser Verlag Basilea.
- Euler, L.,** 1996: Commentationes mechanicae et astronomicae ad physicam cosmicam pertinentes. Opera Omnia, Series secunda, Vol. 31, Birkhäuser Verlag, Basilea.
- Emery, M. y P. Monzani** 1989: Jean d'Alembert. Savant et Philosophe. Portrait à plusieurs voix. Gordon and Breach Sci. Pub. S.A., Glasgow.
- Hadley, G.** 1735: Concerning the cause of the general trade-winds. (Traducción al castellano en Meteorología Colombiana No. 1, Marzo 2000, 95-96.) Phil. Trans. Roy. Soc. London, 39, 58-62.
- Halley, E.** 1686: An historical account of the Trade Winds, and Monsoons, observable in the Seas between and near the Tropicks, with an attempt to assign the Physical cause to the said Winds. Phi. Trans. Roy. Soc. London, 16.
- Kleinert, A.** 1989: D'Alembert et le prix de l'Académie de Berlin de 1746. En Emery y Monzani (1989), pp. 415-431.
- Mariotte, E.** 1686: Traité du mouvement des eaux et autres corps fluides. Michallet, París.
- Mikhailov, G.K.** 2002: Introduction to Daniel Bernoulli's papers on geophysical fluid dynamics and barometrical studies. En Bernoulli (2002).
- Musschenbroek, Pieter van,** 1751: Essai de physique. Luchtmans, Leiden.
- Pelkowski, J.,** 2005: El certamen de 1746 acerca de la causa de los vientos generales. Meteorología Colombiana, No. 9.