
EL CERTAMEN DE 1746 ACERCA DE LA CAUSA DE LOS VIENTOS GENERALES

THE 1746 PRIZE COMPETITION ON THE CAUSE OF THE GENERAL WINDS

JOACHIM PELKOWSKI

Schloss Ziegenberg, 61239 Ober-Moerlen

Pelkowski, J. 2005: El certamen de 1746 acerca de la causa de los vientos generales. Meteorol. Colomb. 9:93-104. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. - Colombia.

RESUMEN

En 1746 la Academia Prusiana de Berlín ofrece un premio al trabajo teórico que mejor aclarara las causas de lo que se conocía como los vientos generales (los alisios y los ponientes de los marineros). En el planteamiento del problema propuesto por la Academia se pide hacer abstracción de los continentes, con el fin de facilitar la destilación de las causas fundamentales de los vientos. De las once contribuciones de los autores que participaron en el concurso, sólo se conservan tres de ellas. Tras una descripción de las circunstancias en torno al concurso, se resumen los tres ensayos que la Academia publicó, además de presentar una contribución posterior, directamente inspirada en el ensayo ganador de d'Alembert.

Palabras Clave: Historia de los vientos, siglo XVIII.

ABSTRACT

In 1746 the Prussian Academy of Berlin offers a prize for the best work on the causes of what was then known as the general winds (the trades and westerlies of the seafarers). In the description detailing the problem proposed, the contributor is asked to lay down a water planet so as to better distill the fundamental causes of the winds. Of the eleven authors that entered the competition, only three contributions have survived. After a narrative of the circumstances accompanying the prize and its subject, we summarize the explanations that were published by the Academy, together with a later one that was directly inspired by the winning prize essay of d'Alembert.

Keywords: History of winds, XVIIIth century.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día es difícil encontrar una definición de los vientos tan sencilla como "el viento es aire que fluye" (Séneca, c. 60 AD), o "el viento es un movimiento rápido del aire" (Mylius, 1747). Séneca, tras abrir el capítulo cuarto de sus famosas Cuestiones naturales con su bella definición del viento, dirigida contra la explicación recóndita que había maquinado Aristóteles, añade que algunos autores lo definieron como "aire que fluye en una sola dirección". Esta definición nos bastará perfectamente para los propósitos de este ensayo histórico.

Una historia de las distintas explicaciones de los vientos aún está por hacer. Aquí sólo me propongo resumir cuatro teorías que se ofrecieron en el siglo XVIII a raíz de un concurso

propuesto por la Academia de Berlín en el año de 1746, que tenía por objeto estimular a los espíritus "geométricos" a dar una explicación moderna de los sistemas de vientos regulares sobre un planeta cubierto de agua. Las academias europeas del Siglo de las Luces se convirtieron en los centros más importantes del progreso científico, junto con algunas universidades mal dotadas. Los premios que se ofrecían a los ganadores de un concurso estaban destinados a fomentar la ciencia, pero al mismo tiempo las academias esperaban que el prestigio de los galardonados les dieran más lustre. Para éstos, los premios solían representar una fuente lucrativa de ingresos adicionales.

La Academia de Berlín, como la de San Petersburgo, fue fundada en el siglo XVIII. La primera, preconizada con ardor por

G. W. Leibniz (1646-1716), había sido creada como una "sociedad de ciencias", bajo la protección del Elector de Brandenburgo, el margrave Federico, quien en 1701 fue nombrado primer rey de Prusia para convertirse en Federico I. Bajo el reinado de su sucesor, Federico Guillermo I, la Academia entró en un período de franca decadencia. Su hijo, Federico II, que asciende al trono en 1740 con aspiraciones de déspota iluminado, se propone remediar la situación de la decadente Academia. Una forma infalible de hacerlo, consistía en instalar a científicos de renombre universal; trató, pues, de atraer a los Bernoulli, padre e hijo, así como al preclaro y prodigioso Leonhard Euler (1707-1783), pero sólo logró seducir a éste. Sin embargo, la reorganización se hizo esperar, pero gracias a los esfuerzos de Euler, es constituida por Federico II la nueva Academia en 1744 y denominada de ahí en adelante "Académie des Sciences et Belles-Lettres de Prusse".

En 1746 Euler es nombrado director de la Sección de Matemáticas, Mecánica y Astronomía, una de las cuatro secciones de la Academia. Como presidente de la Academia es nombrado el matemático francés Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759), quien acepta de buena gana, obedeciendo a los deseos del rey francófilo. Federico II decreta el francés como lengua oficial de la Academia, sustituyendo al latín como lengua moribunda que parecía "haberse refugiado en Alemania", según escribiera jocosamente Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) en el discurso preliminar a la gran Enciclopedia de la Ilustración francesa. En esa misma época, Berlín se convierte en el centro mismo de la Ilustración alemana, y la influencia de Euler sobre los pensadores alemanes —Kant entre ellos— y europeos es tan importante como desconocida.

Tras su reorganización en 1744, y adoptando la costumbre que existía en otros países en ese entonces, la Academia de Berlín comienza a proponer premios sobre diversos temas. Habiendo cuatro secciones, cada una de ellas proponía un tema de concurso cada cuatro años. Sabemos que en 1746 Euler plantea el tema de la causa de los vientos, en el cual se pedía

la determinación del orden y la ley que los vientos han de obedecer si la Tierra estuviese cubierta en todas partes por un océano, de manera que se pueda encontrar la dirección y velocidad del viento en cualquier lugar.

No creemos equivocarnos al suponer que Euler anhelaba dar término a las especulaciones demasiado cualitativas, a veces decididamente descabelladas (v.g., "los alisios son la respiración de los sargazos atlánticos"). Buscaba desafiar a aquellos geómetras —así se denominaban a los matemáticos— que habían contribuido a adelantar eficaz y brillantemente las ramas de la mecánica que se ocupaban de los fluidos y sus corrientes, como lo atestiguan varias memorias que el mismo Euler había publicado hasta entonces, así como la exitosa y parcialmente prematura Hidrodinámica (1738) de Daniel Bernoulli (1700-1782) y los dos tratados de d'Alembert, *Traité de dynamique* (1743) y *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides* (1744). El breve artículo de Hadley (1735), con su venerable explicación de los alisios, tan familiar entre los meteorólogos modernos, no deja de ser una explicación cualitativa, exenta de rigor cuantitativo, como nos recuerda Ed-

ward Lorenz en su magnífico recuento de las teorías sobre la circulación atmosférica (Lorenz, 1967). La explicación que rigió durante todo el siglo dieciocho, la de Edmund Halley (1656-1742), propuesta en 1684, está escrita con un espíritu baconiano de leal respeto por los hechos, mas sin asomo de cuantificación alguna, cosa que no le podemos reprochar a Halley, ya que la matematización de la física no habría de realizarse sino en el siglo siguiente.

El tema elegido por Euler no tiene nada de insólito o exótico para la época, todo lo contrario. Las explicaciones de los vientos regulares abundaban en los manuales para estudiantes. Pero lo que hace del problema planteado por la Academia un hecho históricamente importante es la reacción al reto euleriano de dos representantes máximos de las ciencias exactas durante la Ilustración: A pesar de sus intentos abortivos, sus memorias simple y llanamente marcan el comienzo de la meteorología dinámica moderna.

EL CONCURSO PROPUESTO POR LA ACADEMIA DE BERLÍN

La exposición del tema para el premio de 1746 se hace pública junto con la declaración de las intenciones de la Academia. Ésta precisa: "Los vientos son producidos por tantas causas diferentes, y tan variables, que los filósofos escasamente pueden halagarse de su capacidad para deducir una teoría suficientemente perfecta que les permita determinar los vientos, sobre todo los de los países bastante alejados del ecuador y de los trópicos" (Kleinert, 1989). En vista de la complejidad del tema, la Academia no esperaba una "solución completa". Por lo tanto, propone simplificaciones para poder abordar el problema a través de un análisis matemático: "Si se suponiera 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 por Edme Mariotte (1620-1684) en su obra póstuma sobre el movimientos de los fluidos (Mariotte, 1686), publicada apenas unas semanas antes de que apareciera la famosa explicación de los vientos generales y los monzones que había de dominar en el siglo siguiente (Halley, 1684).

Por "actividad del Sol", según Kleinert (1989), debía entenderse "atracción del Sol", y la Academia excluyó expresamente los efectos causados mediante calentamiento por radiación (solar), agregando que apenas se aclarase la cuestión propuesta, quedaría por investigar "qué modificación podrían causar el calor y la altura de las tierras en el movimiento del aire". Pero como "esta discusión está sujeta a grandes dificultades", la Academia insiste en que sólo es razonable exigir que "un filósofo indique aproximadamente el orden que los vientos deberían seguir si se supone el caso susodicho" (Kleinert, 1989).

Una vez circunscrito el problema, no podía dejar de interesar a los grandes "geómetras" de la época, y menos aún al constituir un reto lanzado por el "príncipe de las matemáticas", como había sido calificado Euler por su antiguo maestro Johann Bernoulli (1667-1748), en una de sus últimas cartas

a aquél. Alexis-Claude Clairaut (1713-1765), newtoniano precoz y autor del importante tratado *La figure de la Terre* (la forma de la Tierra), publicado en 1743, en una carta a Euler fechada en enero de 1745, acusa recibo del prospecto que anunciaba el premio. Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) parece no haber recibido el prospecto sino en agosto del mismo año, y sin duda muchos más recibirían el folleto. D'Alembert inmediatamente puso manos a la obra, terminando una enjundiosa disertación en el plazo de cinco meses. Por razones desconocidas, su memoria demoró en llegar a Berlín, el 12 de marzo de 1746, pero todavía antes del plazo límite, a principios de abril (Kleinert, 1989). Antes de recibir la copia de d'Alembert, sin embargo, Euler aparentemente andaba preocupado por la baja calidad de las primeras dos entregas, y por eso volvió a instar por escrito a su amigo Daniel Bernoulli, hijo de Juan, a que participara en el concurso, a pesar de que aquél le había comentado meses atrás en una carta que no había encontrado nada en el problema que mereciera su atención (Mikhailov, 2002). Al verse rogado, Daniel, para no desilusionarlo, buscó complacer a su amigo redactando en pocos días una memoria, a quien escribe en carta fechada el 19 de marzo de 1746 (traduzco según citas originales en alemán, reproducidas por Mikhailov, 2002):

Es fácil juzgar 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. [...] Mi memoria ...llegará apenas después del plazo fijado. Su lema será: Non ego ventosae plebis suffragia venor [No corro tras los votos de la veleidosa plebe]. [...] He señalado diversas cosas sin demostración, debido al plazo tan corto y muchos otros oficios. [...] Esta vez necesito su indulgencia en todo sentido.

Dos días después de haber recibido el ensayo de d'Alembert, pero antes de que Bernoulli fechara su carta, Euler escribe a Maupertuis: "El sábado pasado recibimos la tercera obra para el premio de este año sobre los vientos. Viene de París, y aunque está en latín, de inmediato reconocí que su autor es el Sr. d'Alembert. Por eso mismo Vd. podrá juzgar fácilmente que es una obra muy profunda, y él trata esta materia de una manera que me encanta. Si no llegan mejores, lo cual dudo mucho, la Academia podrá juzgar con honor." (Euler, 1986.)

El 5 de abril de 1746 Euler escribe a su gran amigo Goldbach que había estado ocupado leyendo las diez obras que habían sido entregadas, entre las cuales se encontraba una que merecía ser considerada por encima de las demás en importancia, y cuyo lema era (Yuskevich, A.P. & E. Winter, 1965):

*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.] Según el reglamento académico, los autores debían permanecer anónimos, pero ya vimos que por necesidad Euler sabía que Bernoulli era uno de los autores, y a d'Alembert lo había reconocido ex

ungue leonem. Aparentemente conocía la autoría de otros autores también, porque en una carta a Maupertuis a 3 de mayo de 1746 escribe Euler: "Se me olvidó mencionarle en mi última carta que tan pronto Vd. se había ido, el marqués de Valory nos hizo llegar una obra sobre los vientos, a pesar de que el plazo ya se había vencido. Pero como es posible que el autor no tuviera parte en ese retraso, no nos atrevimos a rechazar su recepción. Es, pues, la onceaba, y de ninguna manera pone en peligro a aquella *Haec ego de ventis*, por la cual ya se ha pronunciado el Sr. Lieberkühn, aún sin leerla. Sin embargo, será necesario asesorarnos acerca de la manera de proceder, y elegir la pluralidad, a fin de que nadie pueda sospechar que hubo alguna intriga" (Euler, 1986). El marqués Guy Louis Henry fue embajador francés entre 1739 y 1748 ante la corte prusiana. La predisposición del miembro de la Academia que Euler menciona es un indicio de que había motivos extráneos de favorecer a d'Alembert, a quien Federico habría de ofrecer en vano la presidencia de la Academia.

Había, pues, once memorias para evaluar. La Comisión de la Academia, presidida por Euler, unánimemente adjudicó el premio de 50 ducados al autor de la obra con la divisa: Esto os digo sobre el viento, etc. De acuerdo a las actas de la Academia (Winter, 1957), cuando en la asamblea general del 2 de junio de 1746 se quebrantó el sello del sobre con dicha divisa, se encontró que su autor era d'Alembert. Acto continuo, el ganador fue elegido miembro de la Academia, tras de lo cual se procedió a la quema de los demás sobres.

Con la excepción de tres disertaciones, no se sabe qué ocurrió con las ocho restantes. Aparentemente fueron destruidas (como ocurrió por ejemplo con la contribución de Euler en un concurso propuesto por la Academia de París en 1750). Euler, 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, o por haberla tratado con negligencia (véase la reseña sobre los vientos, en latín (Euler, 1996)). El ensayo ganador fue publicado por la Academia en 1747 junto con otras dos memorias que habían recibido el accessit (la aprobación de la Academia). Así, el libro contiene tres de las contribuciones sometidas a la competencia para el año de 1747: la primera en latín, la siguiente en francés, y la tercera en alemán. Las últimas aparecen anónimas, pero hoy sabemos quiénes fueron sus autores: Daniel Bernoulli y Christlob Mylius (1722-1752), publicista, escritor y aficionado a la astronomía. Con respecto a su viejo amigo Daniel, Euler trató de superar su embarazosa situación, en la que había incurrido por su apurada carta rogativa de marzo, alegando relaciones difíciles en la Academia, y apaciguándolo con aquel honroso accessit académico.

La reacción de Bernoulli al comienzo fue comprensiva, incluso cuando se enteró de que d'Alembert había sido el ganador del galardón. Bernoulli admiraba a d'Alembert como matemático, pero tenía serias reservas acerca de su competencia como físico. Sin disimular una cierta desilusión, a fines de junio de 1747 escribe a Euler: "Lamento que el haberme animado a contribuir le haya causado inconvenientes. [...] De paso, le ruego que relea mi memoria con más atención, es posible que tenga más calidades recónditas que las que parece tener a primera vista" (Mikhailov, 2002). En otra carta, escrita en julio

de 1746, Bernoulli insiste, aún sin haber visto la obra galardonada: "Por lo demás,... le aseguro otra vez que no me siento enojado por lo del premio de Berlín. Acaso el Sr. d'Alembert se haya perfeccionado en física desde la publicación de su hidrodinámica, en cuyo caso estoy seguro de que haya merecido el premio antes que yo, ya que redacté mi obra con el mayor afán y de manera bastante superficial, sin mencionar la falta del socorro necesario de los libros" (Mikhailov, 2002). Euler parece haber demorado el envío de la obra de d'Alembert al impaciente Bernoulli, quien no la recibiría sino ¡tres años más tarde! Decepcionado con la lectura del ensayo de d'Alembert, Bernoulli escribe en su última carta a Euler, fechada en enero de 1750, las siguientes palabras: "Cuando uno lo ha leído todo, sabe tanto acerca de los vientos como antes" (Mikhailov, 2002).

En las secciones siguientes, presentaremos un resumen imperfecto de las tres obras en cuestión. Immanuel Kant se dejó inspirar por el certamen de 1746 al elaborar su propia teoría de los vientos en 1756 (véase Pelkowski, 2004). Más adelante discutiremos una contribución tardía, hoy olvidada por entero, que también se inspiró en el problema propuesto por la Academia, tratando de resolverlo de nuevo, cuando todos los protagonistas habían dejado de existir.

LA CONTRIBUCIÓN DE D'ALEMBERT

La contribución premiada no presenta hoy en día mayor interés meteorológico. Me limitaré a un breve repaso de su contenido y a citar unos dictámenes que la caracterizan mejor que yo lo podría hacer, ya que se trata de una obra sumamente compleja, cuya lectura no parece ofrecer ningún beneficio al meteorólogo puro.

D'Alembert reconoce que el calentamiento solar constituye una de las causas de los vientos generales, pero confiesa que su tratamiento analítico sería prematuro: "Mas carecemos enteramente de los principios necesarios para ese cálculo, puesto que ignoramos tanto la ley, según la cual el calor actúa, como la dilatación que produce en las partes del aire" (d'Alembert, 1747). Y agrega inmediatamente que esta "última razón es más que suficiente para determinarnos a hacer abstracción del calor solar", de modo que, "como no es posible calcular con alguna exactitud los movimientos que puede ocasionar en la atmósfera, es preciso reconocer que la teoría de los vientos es apenas susceptible de perfeccionamiento por ese lado." Un poco más adelante, tras considerar el estado imperfecto de lo que hoy llamaríamos la termodinámica de la atmósfera, concluye que la única cuestión general susceptible de ser analizada en su época, era la determinación de los movimientos del aire suponiendo que la superficie del globo fuera completamente uniforme, y bajo la hipótesis de que "la agitación de la atmósfera provenga de la sola atracción de la Luna y el Sol".

Enseguida nos revela su estrategia de cómo proceder en estas materias difíciles: "Pero la mayoría de las cuestiones físico-matemáticas son tan complicadas, que resulta imprescindible el contemplarlas primero de una manera general y abstracta, para luego elevarse gradualmente desde los casos simples a los compuestos. Si hasta ahora se ha hecho algún progreso en el

estudio de la naturaleza, se lo debemos a la observación constante de ese método. Una teoría completa sobre la materia que nos ocupa es tal vez la obra varios siglos" (d'Alembert, 1747).

Ateniéndose a este método, d'Alembert postula primero una esfera sólida en reposo, cubierta de un fluido homogéneo y "sin resorte", y sometida a la acción de las gravedades solar y lunar. Más adelante permite que haya un movimiento relativo entre el globo atraído y uno de los cuerpos celestes, para finalmente admitir que el fluido sea de densidad variable en una dirección. Si el fluido es identificado con la atmósfera, las mareas producidas por el astro, que causa un desplazamiento en bloque de masas enteras, no son, según d'Alembert, no son más que los vientos. En una de las etapas hacia un "caso compuesto", considera un globo de agua con atmósfera encima, o sea, propone uno de los primeros modelos "de dos capas", tan populares en nuestros días.

Tras la lectura de la introducción a su obra, cabe afirmar que lo que d'Alembert se propone hacer, si exceptuamos las últimas partes del tratado, donde incluye las modificaciones del curso y fuerza de los vientos debidas a montañas paralelas (a lo largo de latitudes y meridianos), no es otra cosa que aplicar la teoría newtoniana de la gravitación universal, la cual era aún controvertida en su época. Al ser universal, aquella teoría debía poder aplicarse a un campo como la geofísica, y la oportunidad brindada por el tema del concurso desafió a d'Alembert a aportar nuevas pruebas a dicha teoría, por cuanto una explicación de los alisios basada en la gravitación newtoniana no podía dejar de impresionar a sus detractores, en su mayoría cartesianos empedernidos que, aunque diezmados, aún pervivían en las universidades y academias.

El trabajo impresionante de d'Alembert, sobre el cual no me extenderé más, ¿qué reacciones suscitó en sus contemporáneos? La de Daniel Bernoulli quedó suficientemente manifiesta en nuestras citas anteriores. Son más halagüeñas las dos siguientes citas de dos inmortales geómetras de la generación siguiente, que bien pueden contarse entre los discípulos de d'Alembert.

Joseph Louis Lagrange (1736-1813) escribe a su "estimado e ilustre amigo" d'Alembert en 1778 (citado según Kleinert, 1989): "He releído en estos días ... su memoria sobre la causa de los vientos, la cual había estudiado en mi juventud, y que siempre he considerado como la mejor de sus obras, por su belleza, su novedad y la multiplicidad de métodos que encierra."

Pierre Simon de Laplace (1749-1827), el "Newton" de los galos, en unas investigaciones sobre el sistema del mundo, particularmente sobre las mareas, y en las que aparecen ecuaciones del movimiento de las corrientes marinas con los términos de la aceleración (horizontal) de Coriolis (véase Ripa, 1996), en su intento de superar los defectos de los trabajos anteriores sobre el efecto de la rotación terrestre, dice sobre la obra de d'Alembert (Laplace, 1778): "Es, pues, estrictamente hablando, al Sr. d'Alembert que debemos las primeras investigaciones exactas sobre este tema importante [las mareas]. Este ilustre autor, en su excelente obra *Réflexions sur la cause des vents*, intenta calcular los efectos de la acción solar y lunar sobre nuestra atmósfera, determinando en una forma sintética y muy bella

las oscilaciones de un fluido de poca profundidad, que cubre un planeta inmóvil y sobre el cual responde un astro inmóvil."

¿Y actualmente? Citemos a dos historiadores. El primero, historiador de las matemáticas, aclara (Demidov, 1989): "En nuestra opinión, no era el lado físico del tratado premiado de d'Alembert el que llamó la atención sobre todo de Euler, sino la creación de una nueva rama del análisis matemático, notablemente la de la teoría de las ecuaciones en derivadas parciales, la cual se convirtió poco más tarde en la base de todas las investigaciones sobre la mecánica de los fluidos continuos."

El segundo historiador es un conocedor sin par de la historia de la mecánica del siglo de la Ilustración. Tras mis propios ensayos de "disfrutar" de la obra ganadora de d'Alembert, con su título tan seductor para un meteorólogo aficionado a la historia, no puedo menos que citar la experiencia que de lector tuvo dicho historiador, Clifford Truesdell (1919-2000), admirable dechado de erudición moderna, quien juzgó la contribución de d'Alembert para la historia de la mecánica así (Truesdell, 1975): "Tortuoso, obscuro, inelegante, pretencioso, fatigante con sus rodeos, restricciones inútiles y enredantes, y ejemplos numéricos irrelevantes con hasta seis u ocho cifras a medida que se arrastra de un caso particular o incluso incompatible a otro infinitesimalmente más general —no obstante, finalmente llega a obtener ciertas ecuaciones en derivadas parciales que, se afirma, gobiernan el flujo axialmente simétrico de un fluido compresible en movimiento pequeño sobre una esfera. Después de varios intentos a lo largo de los pasados quince años, he de confesar que nunca he podido seguir las profusas notaciones, conceptos tortuosos e interminable álgebra de d'Alembert en suficiente medida como para decidir si sus resultados son correctos o no".

Con esta caracterización de la contribución de d'Alembert que tanto fascinó a Euler, pasemos a discutir la de Daniel Bernoulli, cuya fama es la del físico-matemático más físico que matemático.

LA CONTRIBUCIÓN DE BERNOULLI

Daniel Bernoulli introduce su memoria *Recherches physiques et mathématiques sur la Théorie des vents réglés* (1747) con una advertencia: "El autor de esta pieza...se cree obligado a prevenir el público de que la compuso sólo para satisfacer a las solicitudes apremiantes de uno de sus mejores amigos, pocas semanas antes del plazo previsto. Esta circunstancia le servirá de excusa por haber tratado bastante superficialmente y con alguna precipitación una materia que merece toda la aplicación de la que uno puede ser capaz...El autor juzga el éxito inopinado de su ensayo como una aprobación de los principios de los cuales se sirvió, la cual bien podría inducirlo a retomar algún día esta importante materia..." (Bernoulli, 1747).

En el párrafo siguiente, se pregunta Bernoulli si la teoría de los vientos sería menos oscura si desde un principio se hubiese seguido el sendero indicado por la ilustre Academia. Es decir, si se hubiese reducido el problema a sus primeros principios efectivos, y dejando de lado las causas secundarias que cortan el paso a todo conocimiento. Según Bernoulli, las causas secundarias consisten en la casi infinita

irregularidad de nuestra Tierra, mientras que los primeros principios, permanentes ellos, se han de buscar en el movimiento de la Tierra y la acción solar, y, acaso, la lunar.

Procede entonces a definir un problema más simple que el propuesto por la Academia, introduciendo el modelo de un canal que contiene a la atmósfera ecuatorial. Una hipótesis básica de su teoría se refiere a la elasticidad del aire, el cual, siendo dilatable en toda su extensión, precisa de una "fuerza contraria" que impida su expansión y lo retenga dentro de sus confines. Descartando la posibilidad "absurda" de una atmósfera infinita, busca en una "atmósfera solar, en la cual nadan todos los planetas", el fluido compresor que mantiene a nuestra atmósfera dentro de sus límites. Para ello es preciso que en el tope de la atmósfera la elasticidad (presión) sean iguales de uno y otro lado. Se tiene, pues, en el plano ecuatorial, el modelo de un fluido limitado por el ecuador y por un círculo de radio igual al terrestre más la altura de la atmósfera, donde ésta está obligada por "adhesión" a asumir una velocidad de rotación nula, mientras que el ecuador gira con la velocidad diaria de la rotación de la Tierra. Bernoulli supone la atmósfera solar exenta de movimiento, sin detenerse en lo que eso podría implicar si se tuviera en cuenta la revolución de la Tierra alrededor del Sol. Podríamos expresarnos modernamente diciendo que el modelo que Bernoulli está proponiendo, es un prototipo del flujo de Couette entre dos cilindros, uno estacionario y el otro en rotación uniforme. Es importante destacar que Bernoulli incluye en su modelo la viscosidad del fluido o "fuerza de adhesión mutua", cuya ley, dice deplorándolo, no es suficientemente conocida. Bernoulli contempla capas delgadas (infinitesimales), en movimiento de rotación sólida, y sometidas a mutuas fuerzas de cizalladura, cuyos momentos considera constantes en dirección perpendicular al ecuador. Los valores numéricos que logra calcular provienen de una fórmula que deriva a partir del equilibrio de pares de fuerzas, o, expresado modernamente, de la aplicación de la ley de conservación del momento angular a una situación estacionaria. Por cada 100 m el viento aumenta su velocidad en 5 m/s. Es fácil imaginar cómo se crean los alisios en su modelo: para quien viva en el ecuador, el rozamiento impide que sienta aire en los pies, y, dependiendo de la altura de la atmósfera, el viento aumenta más o menos rápidamente con la altura, pudiendo hasta convertirse en ¡corriente de chorro en el tope de la atmósfera! Bernoulli ajusta los valores de densidad y altura atmosférica de tal forma que puedan despelucar a una persona. Aunque nadie parece haberlo señalado, acaso porque nadie haya leído la memoria de Bernoulli, al menos antes de que se reimprimiera en sus obras completas (Bernoulli, 2002), tengo la impresión de que Bernoulli aplica en esa obra sobre los vientos, por primera vez en la historia de la hidrodinámica, una forma particular del equilibrio de pares de fuerzas a un problema geofísico, que décadas más tarde se convertiría en el principio de conservación universal del momento angular, tan importante como el de la conservación del momento lineal.

Bernoulli concluye la primera sección de su memoria anotando que la velocidad del viento tiene que disminuir con la latitud y, sin entrar en detalles, ofrece una estimación grosera de esa disminución, como siendo proporcional al coseno de la latitud.

Una vez resuelto el problema del flujo con cizalladura, que había desembocado en una distribución vertical de la componente este-oeste de los alisios, Bernoulli procede al estudio de las oscilaciones diarias de la velocidad del viento, debidas al calentamiento de la atmósfera por el sol durante el día, y a su enfriamiento nocturno. El problema es enfocado nuevamente para la configuración simple de una simetría axial en el plano del ecuador, que se supone coincidir con la eclíptica. Bernoulli presenta sus resultados en forma de una tabla, en la que figuran los vientos horarios que soplan en la mañana y durante el día, de oeste a este, así como los vientos nocturnos, de este a oeste.

Finalmente, Bernoulli considera la distribución de los vientos anuales, pero esta vez teniendo en cuenta el cambio de las estaciones, es decir, la inclinación de la eclíptica. Las estimaciones burdas que obtiene para las velocidades meridionales no exceden 0.3 m/s. Según el resumen de Mikhailov (2002), Bernoulli no presta atención al papel fundamental que desempeñan las diferencias de calentamiento en la atmósfera y, por consiguiente, las diferencias de presión atmosférica superficial entre la zona tórrida y los polos, que son las que dan origen a los flujos meridionales hacia el ecuador, tan importante en la teoría de la circulación atmosférica propuesta por Hadley una docena de años antes, pero que Bernoulli no parece haber conocido.

Bernoulli también examina otras causas. Observa, por ejemplo, que el sol no sólo dilata el aire con su calor sino que engendra igualmente una especie de aire nuevo, por cuanto aumenta la evaporación de las aguas. Discute la dependencia latitudinal de la evaporación, y saca algunas conclusiones cualitativas de índole climatológico. Nos informa también que a raíz de unos cálculos relacionados con la cantidad observada de la evaporación bajo diferentes latitudes, ha encontrado que esa misma evaporación puede producir vientos suficientemente fuertes en las capas cercanas a la superficie. Señala que la distribución, temporalmente variable, de la evaporación de los mares y aguas continentales podría explicar las brisas, pero se abstiene de comentarios adicionales, en vista de que no atañen el problema propuesto por la Academia.

En la parte final de su tratado, Bernoulli analiza los efectos de la Luna sobre la atmósfera, y en una carta a Euler afirma que no son distintos de lo que había demostrado en su tratado sobre las mareas oceánicas, tratado que había compartido el premio adjudicado por la Academia de París en 1740 a tres trabajos que participaron en el concurso por la explicación de las mareas. Entre los ganadores se encontraban Euler y Colin MacLaurin (1698-1746), discípulo británico de Newton.

Curiosamente, y como ya se insinuó más arriba, la memoria de Daniel Bernoulli nunca fue citada por autores posteriores, ni siquiera por aquellos que hacen referencia a los dos otros ensayos publicados en el mismo volumen de 1747. Parece que prácticamente fue pasada por alto hasta el análisis perceptivo del historiador ruso, Gleb Mikhailov (2002).

LA CONTRIBUCIÓN DE MYLIUS

La tercera memoria que encierra el volumen publicado por la Academia, de Mylius, lleva por título: Versuch einer Bestimmung der Gesetze der Winde, wenn die Erde überall mit einem tiefen Meer bedeckt wäre (Intento de determinar las leyes de los vientos, si la Tierra estuviera totalmente cubierta por un océano profundo). Se ha dicho que la obra es interesante sólo como contrapunto a las dos que la anteceden en el volumen, e indicativa del nivel de aquellas que se condenaron al olvido (Kleinert, 1989), pero tengo para mí que esa sentencia es demasiado severa. En su memoria, el malogrado Mylius elige, como para remediar el defecto en la explicación de d'Alembert, la elasticidad del aire como única causa de los vientos. Elasticidad es una propiedad del aire que ha de ser "activada" por una causa externa. Tal causa es el calentamiento solar y posiblemente la atracción solar y lunar. El calentamiento del aire lo hace menos denso y, en virtud de su propia elasticidad, el aire circundante se precipita desde todos los lados hacia donde ha sido enrarecido, o sea, hacia el punto "subsolar", y como ese punto progresa constantemente con el movimiento aparente del sol, el aire que se encuentra al este fluye continuamente hacia ese punto. (Mylius guarda silencio sobre lo que ocurre de noche, aunque más adelante menciona una especie de histéresis como explicación de los vientos perpetuos del este.) "En un acuplaneta, el sol, en virtud de su calor, causará por doquier un viento", dice Mylius, recurriendo a un argumento bien conocido en su época. Por otro lado, Mylius rechaza la explicación de muchos naturalistas del siglo anterior que imaginaban al aire demasiado liviano como para poder seguir el movimiento de la Tierra en rotación, creando así los vientos. La gravedad, razona, al atraer el aire lo obliga a moverse con la misma velocidad que el cuerpo sólido en rotación. Y agrega que otra explicación de los alisios, a efectos de que en la zona tórrida el aire es más liviano, es refutada por las observaciones barométricas de Halley y otros.

Mylius no excluye del todo las mareas. Nos explica que la atracción solar causa un abultamiento de la atmósfera que se mueve con el sol aparente, un abultamiento que implica aire dilatado y por ende vientos. Según este razonamiento, la luna debería causar un viento, "mucho más sensible", que seguiría a la marea alta resultante de la atracción, produciendo así los vientos del este.

En un párrafo central, mediante unas consideraciones geométricas, prueba que los efectos del calentamiento solar son proporcionales al ángulo de incidencia de los rayos solares, definiendo por ángulo de incidencia la elevación del sol sobre el horizonte. Es consciente del hecho de que con un sol bajo, el calentamiento resulta adicionalmente reducido debido a la intercepción de rayos que han de atravesar una porción mayor de la atmósfera, pero descarta el efecto como irrelevante para su teoría de los vientos.

A continuación, afirma efectivamente que la insolación es proporcional al coseno de lo que es hoy nuestro ángulo de incidencia, una proporcionalidad que considera ser una verdad mecánica, ya que "los rayos solares, como cuerpos en movimiento rectilíneo", golpean más duro cuando provienen

de direcciones cercanas al cenit. Sus explicaciones al respecto tienen aire de teoría esencialmente acabada: "la fuerza del viento o su velocidad ha de ser proporcional al enrarecimiento del aire, y por lo tanto al calentamiento de éste, y por consiguiente al seno de la elevación solar". Conociendo el ángulo de incidencia de los rayos del sol en un lugar dado, inmediatamente se obtendría el viento relativo del lugar. Para obtener el viento absoluto, Mylius arbitrariamente asigna la unidad de la fuerza del viento a aquella fuerza que resulta de la insolación bajo un ángulo de elevación igual a 1° .

Los resultados son presentados en forma de tablas, para latitudes y estaciones diferentes. Finalmente, con el fin de encontrar la dirección del viento bajo latitudes diferentes, aplica un procedimiento semejante, basado en una hipótesis igualmente arbitraria y algunos cálculos elementales.

Luego repasa, a la luz de su teoría, otros efectos y otras causas posibles, así como objeciones concebibles a su teoría, llegando a la conclusión de que en un acuaplaneta las siguientes causas potenciales son despreciables: las atracciones solar y lunar, las refracciones de los rayos solares, los eclipses solares, la excentricidad de la órbita terrestre, ¡e incluso la declinación del sol! Juzga igualmente despreciables los efectos de los vapores provenientes de los océanos que, aunque responsables de múltiples irregularidades en nuestra Tierra actual, no influyen en el régimen de vientos en un acuaplaneta, ya que la evaporación, a pesar de ser zonalmente uniforme, depende de la elevación solar, de modo que no puede resultar ninguna desviación de los vientos de su comportamiento conforme a las "leyes generales".

En un apéndice, remata sus deliberaciones con unas observaciones generales sobre la Tierra real y el acuaplaneta ideal: "Muy probablemente nunca llegará el día en que seamos capaces de determinar asaz correctamente las leyes de los vientos en nuestra Tierra tal como realmente es." Sin embargo, añade, aun los vientos terrestres no están enteramente desprovistos de orden: "Tengo a menudo el placer de ver realizados mis pronósticos tanto del viento como del tiempo, y de descubrir cierta conformidad entre el orden de los vientos actuales y los del acuaplaneta."

El conocido escritor alemán, Gotthold Ephraim Lessing (1729-1781), amigo de Mylius, vacila, en su prólogo a un libro póstumo de escritos misceláneos de su primo, entre dos aspectos de la personalidad del periodista astrónomo: "Será difícil decidir si el Sr. Christlob Mylius se hizo conocer más como un espíritu graciosamente ingenioso o como un conocedor de la naturaleza, si sus últimas empresas no nos inclinaran a decidírnos por este lado de su personalidad".

EL PROGRAMA DE VON LINDENAU

Más de medio siglo después, un astrónomo alemán de Gotha, Bernhard August von Lindenau (1779-1854), se proponía resolver nuevamente el problema propuesto por la Academia de Berlín en 1746. Tras repasar las teorías de los vientos desde la Antigüedad hasta el fin del siglo XVIII, y consciente de la falta de observaciones sobre el viento, sin las cuales

su impacto sobre los distintos climas de los países no podía conocerse, afirma que "sería interesante tratar de determinar, de la teoría de d'Alembert, o mejor aún de la teoría de las oscilaciones atmosféricas de Laplace ...las corrientes de viento que probablemente tienen lugar en cada zona y en cada punto de nuestra tierra."

Von Lindenau considera la teoría de los vientos como una disciplina de la geografía física. En su repaso histórico considera a Francis Bacon (1561-1626) como el primer fundador de una teoría basada en "principios correctos", por haber reconocido las causas de los vientos en "una expansión de aire que depende del trayecto del sol, y una comunicación o condensación producida por fuerte enfriamiento". Rechaza la explicación dada en la época de Galileo y Newton: "Descartes, Rohault, Mersenne, y muchos físicos del siglo XVII consideraban la rotación de la Tierra como la causa primaria de los vientos constantes, pero en un sentido falso." Al igual que Mylius décadas antes, señala que aquellos creían que el aire, que se tenía por un fluido ligero, se rezagaba en su rotación con respecto a la Tierra, y tanto más cuanto más grandes son los círculos en que se había de mover, explicación que investigaciones más recientes habían demostrado ser falaz, debido a la adhesión de las partes atmosféricas. La gravedad de la Tierra y la fricción superficial prontamente comunicarían a la atmósfera la misma rotación que aquélla. Los lectores matemáticos que aún necesitaban convencerse de esa verdad eran remitidos por von Lindenau al tratado de d'Alembert sobre los fluidos, "donde esta materia está tratada bellamente". Luego nos informa que en 1806 aún se admitía la teoría de Halley, aunque modificada, por la mayoría de los físicos. De la fecha de publicación del trabajo de Halley (1686) salta a 1730, año en que aparece un ensayo sobre las causas de los vientos, premiado por la Academia de Bordeaux, siendo su autor el reverendo Padre jesuita Nicolas Sarrahat (1698-1737), de quien afirma que innegablemente había logrado explicar satisfactoriamente varios de los vientos principales; elogio infundado, ya que el matemático de Marsella no sale del marco del siglo XVII, ni tampoco deja entrever la explicación que Hadley inventara cinco años después.

Von Lindenau, continuando su resumen histórico y haciendo caso omiso del trabajo de Hadley, declara que en la evolución de las teorías de los vientos "una nueva época despuntó en el año de 1746". Describe entonces el problema propuesto por la Academia de Berlín para ese año, menciona la obra coronada de d'Alembert y agrega que la de Mylius había sido aprobada para publicación, pero curiosamente pasa por alto la contribución de Daniel Bernoulli. Del trabajo de Mylius nos revela que sus principios no eran nuevos, y que sólo la teoría de d'Alembert había desbrozado un sendero enteramente nuevo, al mostrar mediante un excelente análisis que los vientos podían resultar de la gravitación del Sol y la Luna. Luego procede a evaluar la teoría de d'Alembert, cuya admiración parece haber heredado de Laplace: "La idea de que la fuerza que crea las mareas debería de generar oscilaciones parecidas en la atmósfera, explicando de ese modo las oscilaciones constantes y periódicas de la atmósfera como el resultado de una ley universalmente reconocida, ciertamente era hermosa, y digna de un geómetra como d'Alembert. La expresión general que d'Alembert encuentra en el § 47 de su teoría, y de la

cual pueden deducirse bajo ciertas modificaciones vientos del este y del oeste, necesariamente tiene que retener la atención de cada matemático. Y ciertamente es perdonable que, deleitado con el hermoso método sobre el que descansa el análisis, así como con la aclamada verdad de su único principio, sobre el cual es erigida con noble simplicidad toda la teoría, no haga caso de una que otra anomalía y tenga el sistema por el verdadero" (v. Lindenau, 1806; su cursiva). Voluntariamente reconoce haber estado bajo el mismo hechizo hasta que se vio obligado a abandonar a regañadientes la convicción de que la gravitación del Sol y la Luna fueran la causa de los vientos regulares. Además, nos recuerda que d'Alembert había despreciado la elasticidad del aire, una "aproximación un tanto arbitraria", que, junto con la "infinita dificultad" de encontrar de sus expresiones la dirección y fuerza del viento, así como el hecho de que no se daba razón de los vientos del norte y del oeste en ambos hemisferios, hacía de la teoría algo "prácticamente inútil". Ahora, si se pudieran considerar las oscilaciones atmosféricas como causadas por la gravitación del Sol y la Luna, de naturaleza análoga a las del mar, simplemente se podría invocar un resultado de Laplace que relacionaba la magnitud de las mareas y la profundidad del océano. Siendo, pues, la intensidad dependiente de la profundidad del océano, se podría concluir que por ello mismo las oscilaciones atmosféricas deberían ser más pequeñas que las oscilaciones del mar, porque, "conforme a las observaciones más exactas", la altura de la atmósfera es mayor que la profundidad del océano. Añade von Lindenau que las capas superiores de la atmósfera son demasiado tenues como para comunicar apreciablemente su presión a las inferiores. Si esto se combina con lo que se sabe empíricamente (v.gr., la observación de los buceadores de que incluso en condiciones tormentosas el movimiento de un fluido se circunscribe a las capas superiores) y lo que se conoce por la teoría (cita la *Mécanique analytique* de Lagrange, de 1788, en el mismo sentido), entonces parece desprenderse claramente de "esta descripción meramente superficial" que la gravitación de los cuerpos celestes no puede producir movimientos perceptibles en la atmósfera. Von Lindenau no niega rotundamente la posibilidad de tales movimientos producidos por una gravitación externa, pero cree haber probado su insuficiencia como explicación de los vientos permanentes. Luego discute las medidas de los barómetros, tan perfeccionados en su tiempo, y el uso que de sus indicaciones hiciera Laplace en su teoría de las mareas (con fricción en superficie), sacando la conclusión de que las corrientes aéreas resultantes eran demasiado débiles como para ser observables.

Von Lindenau remata su relato histórico apuntando que las academias de París y Dijon habían propuesto el mismo tema en posteriores concursos, la primera en 1751 y la segunda en 1780. Nos informa que los autores premiados habían sido Daniel Bernoulli y el Caballero de la Coudraye, respectivamente. Daniel Bernoulli había, efectivamente, ganado un premio doble en un concurso en el que se pedía "la mejor manera de determinar en mar la fuerza y dirección de las corrientes" (Bernoulli, 2002). La pieza coronada de La Coudraye (1743-1817), *Théorie des vents*, cuya primera edición se publicó en 1786, no representa ningún progreso en la teoría de los vientos.

Al final de su segunda entrega, von Lindenau promete ofrecerlos su propio tratamiento del tema propuesto por la Academia

de Berlín, prestando atención al requisito "si terra undique profundo Oceano circumdetur", o sea, conservando la idealización de un planeta cubierto de agua. Señala que d'Alembert no había excluido el calentamiento (solar) como causa posible, pero que había elegido la gravitación como única causa primaria, porque de otra manera no hubiese sido posible determinar matemáticamente la fuerza y dirección de los vientos. Von Lindenau respetuosamente se permite contradecir al "gran geómetra", sin temor a pecar de precipitado, puesto que el estado de la ciencia había progresado hasta tal punto que permitía embestir de nuevo el problema de 1746.

En su tercera entrega de 1806, von Lindenau enuncia su programa para una teoría suficiente de los vientos. Con el fin de establecer las leyes principales independientemente de las numerosas circunstancias accidentales propias de la Tierra, von Lindenau supone un planeta de agua, cubierto por un fluido menos denso, su atmósfera. Ambos fluidos se consideran entrelazados por cuanto en la atmósfera se producen "humedades acuosas" por condensación de vapores, y de los océanos se desprende agua por "expansión" (evaporación). Erige en axioma la afirmación de que todos los movimientos observados han de considerarse como consecuencia de la perturbación de un estado de equilibrio. El objeto de sus estudios es la determinación tanto de las perturbaciones de las capas atmosféricas en equilibrio como de las causas productoras de movimiento, sin las cuales prevalecería el reposo absoluto. Enumera cuatro agentes activos:

- 1) La rotación de la Tierra
- 2) La condensación y rarefacción de la atmósfera en virtud del calor solar
- 3) El movimiento general de los mares, y
- 4) La gravitación de la Luna.

Anota a continuación que está lejos de considerar al primero como la causa primaria, dejando para más adelante la demostración de cómo es que la inercia de la atmósfera lleva a un movimiento aparente. En seguida dice acerca de su segunda causa: "Como es bien sabido que el calor dilata el aire, y el frío lo condensa, y que el aire más denso tiende hacia el más enrarecido, se sigue que ha de tener lugar una corriente constante de aire, de la atmósfera polar hacia el ecuador. Ahora bien, como la atmósfera polar no tiene, a raíz de la menor velocidad de rotación de las latitudes altas, el movimiento veloz de oeste a este de las latitudes cercanas al ecuador, no puede, en virtud de su inercia, adoptar instantáneamente la celeridad de rotación de las latitudes finales, y por lo tanto se rezaga hacia el oeste, con lo cual resulta un viento del este." Acto continuo procede a deducir una ecuación para la velocidad de la corriente del viento resultante, partiendo de la "conocida teoría del movimiento compuesto", y tras algunas asunciones simplificadoras, deduce su "expresión general" que permite calcular la componente O este-oeste del viento aparente del noreste (v. Lindenau, 1806):

$$O = \frac{2\pi a}{T} \left[\cos \varphi' - \cos \varphi \sqrt{1 + \frac{T^2 V^2}{(2\pi a \cos \varphi)^2}} \right]$$

donde a denota el radio de la Tierra (presuntamente en metros), T el período de la rotación diurna (en segundos), V la velocidad de un viento del norte, φ y φ' las latitudes original y final, respectivamente. Para $\varphi = 18^\circ$ y $\varphi' = 20^\circ$, $V = 10$ m/s se obtiene $O = 5.45$ m/s. Von Lindenau concluye que las velocidades resultantes, aunque probatorias de la influencia de la rotación diurna de la Tierra en producir un viento del este, son demasiado pequeñas para explicar los fuertes levantes.

Von Lindenau pasa entonces a considerar su causa favorita, la dilatación del aire por medio del calor en las zonas tórridas y su compresión por enfriamiento, que hace que el aire más denso de las regiones polares fluya hacia el ecuador. Basa su razonamiento en las diferencias de presión que resultan de las diferencias de densidad, puesto que "es sabido que la elasticidad del aire está relacionada con la presión, y, por consiguiente, aire más denso tendrá una elasticidad mayor que el aire más dilatado". Y como "las partes elásticas de la atmósfera tienen una tendencia permanente a extenderse", el equilibrio así perturbado conlleva que "las capas más comprimidas o densas de la atmósfera se muevan hacia las partes más dilatadas". Al mismo tiempo, como es reconocido que los fluidos son dilatados por calentamiento y condensados por enfriamiento, siempre habrá un viento hacia las regiones más cálidas. Concluye aclarando que la "diferencia de temperaturas es por lo tanto lo que causa las corrientes aéreas más importantes, que dependen menos del calor o frío absolutos de los espacios contiguos que de sus temperaturas relativas". Tras algunas observaciones sobre la acción del calor sobre las "moléculas" del aire, en comparación con la misma acción sobre distritos enteros, que es la responsable de la producción de los vientos, y con el objetivo de determinar la magnitud y dirección de los vientos sobre un acuplaneta por calentamiento solar, "tenemos que determinar las diferencias de temperatura, en parte entre latitudes distintas, pero también en un punto a diferentes horas del día, y en parte entre meridianos distintos". Mediante un razonamiento intrincado, explica que todos los puntos al oeste reciben un mayor grado de calor que los que se encuentran al este, invocando como justificación unos "resultados matemáticos", de acuerdo a los cuales el máximo de calor (temperatura) tiene lugar dos horas después de que el sol haya cruzado el meridiano.

Von Lindenau ofrece sus apologías por haberse detenido largamente sobre ese punto, alegando como excusa una cierta tendencia en sus contemporáneos a rechazar la "condensación y dilatación de la atmósfera por los rayos solares como causa de los vientos constantes." Pero en lugar de refutar la suposición de que "la rotación de la Tierra es la única causa de los vientos del levante", él prefiere llevar a cabo su plan de ofrecer "la teoría de los vientos que en mi opinión es la más fiable".

Finalmente von Lindenau acomete la tarea de determinar la temperatura en función de la latitud, en conformidad con el programa esbozado. El lector espera, después de semejante preámbulo, participar del despliegue virtuoso de su plan, a guisa de su admirado maestro d'Alembert, o sea, *more geometrico*, pero desgraciadamente cae víctima de un desencanto instantáneo: la "tarea está resuelta, pero no vamos a entrar en detalles aquí porque eso exigiría por un lado extensas discusiones analíticas, y por otro, el tema se tratará más

completamente en el trabajo prometido sobre tablas barométricas". Como fundador de la teoría ocultada, von Lindenau cita a Halley, añadiendo que había sido desarrollada más tarde por Euler, antes de que Gregorio Fontana (1730-1805) la elaborase cabalmente. Para estimaciones grosso modo, utiliza la entonces difundida fórmula de (Johann Tobias) Mayer (1723-1762), que describía la dependencia latitudinal de la temperatura mediante una interpolación.

Von Lindenau interrumpe brevemente la ejecución de su plan para comentar sobre las dos causas restantes que figuran en su lista anterior. La tercera causa de los vientos es tildada de evidente, puesto que de los mares se elevan vapores que obligan al aire a seguir el rumbo de las corrientes marinas. Como el peso de los mares es menor bajo el ecuador, en virtud de la rotación terrestre y las mayores cantidades de vapor evaporado allí, la disminuida masa de agua causa corrientes desde ambos polos que, desviándose, se convierten en corrientes del este, contribuyendo así a los alisios.

Como cuarta causa de los vientos, o sea, la atracción lunar, von Lindenau cree que influye sobre las oscilaciones atmosféricas, pero aun si su acción fuese el triple en intensidad que la atracción solar, las atracciones de ambos cuerpos serían demasiado pequeñas para hacerse notar. Por consiguiente, es descartada de su lista.

Después de un cierto retraso aparece la última entrega de sus "contribuciones a la teoría de los vientos notables" (von Lindenau, 1807). Ofrece sus excusas por el retraso, confesando que se había debido en parte a otras ocupaciones y en parte a "la cantidad de dificultades" con que había tropezado al comparar sus resultados teóricos con la "verdadera naturaleza de las cosas", refiriéndose sobre todo a las observaciones publicadas en una flamante obra de Ch. Romme, *Tableaux des vents, des marées et des courans*, aparecida apenas el año anterior, obra que lo había privado del deseo de "reunir los fragmentos bosquejados sobre este tema". Podemos sospechar confiados de que nuestro autor comenzó a sentirse apabullado por el tamaño de la tarea que enfrentaba, tratándose de nada menos que una teoría matemática como la que aquel sabio serbio, Milutin Milankovitch (1879-1958) resolviera más de un siglo después, quien dedicó su vida entera a la tarea de calcular teóricamente la insolación terrestre!

A pesar de ese golpe inicial, para von Lindenau empezó a dibujarse un plan nuevo desde un ángulo distinto. Si realmente resultara factible determinar teóricamente los vientos de un acuplaneta, las investigaciones futuras podrían enfocarse en la explicación de las diferencias entre los estados teórico y observado, en el último de los cuales intervienen factores como la forma y posición de los continentes, pudiéndose identificar así su influencia en los sistemas de viento: "Si podemos establecer una analogía con la astronomía, yo diría que las corrientes de viento que resultan de la teoría general, han de interpretarse como vientos medios, cuyas modificaciones o perturbaciones han de determinarse mediante la inclusión de los continentes, que inicialmente faltaban". Acto seguido procede a analizar el efecto total de las tres causas que operan, según había demostrado, en su

teoría de los vientos generales: "Puesto que un efecto no siempre es exactamente una función absoluta de la causa original... una y la misma causa puede dar lugar a fenómenos diferentes, aun simultáneamente, y por ende, para poder determinar correctamente la suma total de varios efectos individuales, escapando a la incertidumbre..., en lugar de sumar los efectos individuales observados, deberíamos remontar a la causa original, con el fin de explicar la suma total de sus efectos simultáneos, diversamente modificados."

A continuación, procede a reducir la primera y tercera causas a aquella que involucra solamente el calentamiento, arguyendo que como las corrientes oceánicas son producidas por el calentamiento diferencial, la causa de su movimiento se reduce a la segunda. Y de manera semejante, la primera puede reducirse a la segunda, puesto que la rotación de la Tierra sólo puede intervenir después de que el calentamiento haya producido una corriente. De modo que todo lo que quedaba por hacer es hallar la distribución del calor sobre la Tierra, y así la posibilidad de subsumir una teoría de los vientos en unas representaciones analíticas de la distribución del calor "será evidente al lector de nuestra exposición, y todo dependerá en primer lugar de una discusión general de la relación entre el calor, la latitud geográfica y la declinación del sol". Redondea su programa general de los vientos observando que tan pronto estuviera cumplida la tarea descrita, se debería proceder a determinar la dependencia entre la "condensación de la atmósfera", la evaporación de los mares bajo diferentes latitudes y la temperatura, de modo que "la teoría entera de las perturbaciones atmosféricas podría fundamentarse en el desarrollo necesario de estas tres funciones."

Como habíamos visto anteriormente, von Lindenau ahorró a los lectores de la revista los detalles de su cálculo de la distribución del calor, por ser "discusiones de una materia meramente física". Anota que "la diferencial del calor solar" es proporcional al coseno de la latitud, y exhibe una ecuación tomada de las *Disquisitiones physico-mathematicae* de Gregorio Fontana, publicadas en 1780. Se percató de la dificultad de integrarla para determinar el mayor calor en un día y el día más caliente del año, buscando definir un promedio del calor acumulado, logrando así esquivar unas ecuaciones trascendentales, pero todo ello sin exponer los detalles. Da solamente los resultados finales en forma de tres tablas, y procede a su discusión.

Todas las tablas se refieren sólo al rango de latitudes entre 0° y 60° N. La primera tabla muestra los máximos del calor relativo (normados con la constante solar desconocida), en los meses de verano y para el hemisferio norte. La segunda tabla muestra los tiempos del mayor calor diario y anual, mientras que la tercera tabla muestra, en términos modernos, la insolación anual y global (normada, y sólo dentro del rango de latitudes seleccionado). Observa que la primera tabla muestra que "erraríamos, si suponiésemos que el mayor calor siempre tiene lugar en el ecuador". Anota también que en el solsticio la temperatura aumenta con la latitud, siendo la razón de ello una insolación prolongada, antes que la elevación del sol. Compara sus resultados con los datos del reverendo Padre Louis Cotte (1740-1815), publicados en 1788 en un complemento a su famoso tratado de meteorología de 1772,

y encuentra que concuerdan razonablemente bien. Especula que en general el hemisferio sur es un poco más frío que el hemisferio boreal, en virtud de los veranos más cortos y la escasez de continentes. Termina afirmando que las tres tablas "contienen las razones y los elementos, en base a los cuales se ha de desarrollar la teoría general de los vientos".

Finalmente discute las consecuencias de la distribución del calor para la teoría de los vientos, concluyendo que la dirección de los alisios debería desplazarse de noreste en invierno a este-noreste en verano, debido al contraste térmico. Llama a la zona intertropical de convergencia "la zona de movimiento atmosférico inhibido", cuya posición depende de la estación del año, caracterizándola como la zona de copiosas precipitaciones, que al dejar vacíos parciales, da lugar a las tormentas e incluso huracanes.

Afirma también que los vientos constantes requieren de grandes diferencias de temperatura y por ello no pueden esperarse vientos alisios en latitudes más altas; y los vientos del poniente que descienden de las capas superiores de la atmósfera contrarrestan los de levante, neutralizándolos hacia las latitudes de 32 a 33° N; más allá de éstas, predominan los vientos de poniente. Los monzones, advierte, no pueden ser explicados dentro de su teoría, ya que para poder existir requieren la presencia de continentes.

El fabuloso plan del "participante tardío" al concurso de 1746 no sólo tropezó con grandes obstáculos analíticos, sino que estaba condenado a fracasar cuando ya se anunciaban las isotermas de Humboldt, que le dieron un rumbo nuevo al programa de von Lindenau. Las isotermas de Humboldt mostraban inflexiones no predichas por las teorías vigentes, pero parece que muy pocos de los naturalistas "aplicados" en el siglo XIX entendieron la idea básica del maravilloso plan de von Lindenau, el cual ha quedado sumido en el olvido total hasta nuestros días.

CONCLUSIÓN: LA TEORÍA DE FERREL

Las isotermas introducidas por Humboldt en 1817 y sus investigaciones en geografía física, desacreditaron los intentos de calcular teóricamente la distribución de la insolación sobre la superficie terrestre, y con ella la distribución de los vientos generales debidos al calentamiento solar. El modelo de un "acuaplaneta" fue abandonado como irrelevante para la explicación de las distribuciones de los elementos meteorológicos en una Tierra con una geografía que las observaciones, cada vez más detalladas y abundantes, revelaban ser de influencia decisiva sobre aquellas distribuciones.

Los esfuerzos en las primeras décadas del siglo XIX se centraron en la investigación de las perturbaciones de los "vientos generales", perturbaciones que no tardaron en identificarse como "tormentas giratorias", dotadas de sus propias regularidades. Gradualmente se reconoció el papel decisivo de la rotación terrestre en la formación de sistemas arremolinados en medio de las grandes corrientes aire.

En ninguno de los ensayos que concursaron por el premio de la Academia de Berlín se examinó el papel de la rotación

terrestre desde un punto de vista afín al de Hadley (1735) en su esfuerzo pionero. La famosa explicación que dio Hadley de los vientos alisios y los ponientes, en la que de hecho se hace abstracción de los continentes, constituyendo por lo tanto un acuaplaneta, "carece de rigor matemático", según Lorenz (1967), mientras que la elaborada teoría de d'Alembert, enteramente rigurosa en su época, carece de base meteorológica. Ningún otro autor del Siglo de las Luces se empeñó en conseguir el mismo rigor de d'Alembert, aunque hubo quienes dieran con la misma explicación cualitativa de Hadley.

La meteorología tuvo que esperar más de un siglo antes de poder presenciar la solución del problema con el rigor matemático que Euler había pedido en 1746. Pocos sospecharíamos que en el joven continente americano floreció el meteorólogo que con rigor laplaciano hubiese sido merecedor del premio ofrecido por la Academia Prusiana. No sabría ofrecerle al lector una mejor descripción de la distancia que media entre los tanteos de nuestros héroes iluminados y el progreso realizado hacia mediados del siglo XIX, que la que dio en la introducción a su primer ensayo sobre el tema (Ferrel, 1856) el influyente meteorólogo norteamericano William Ferrel (1817-1891):

La Tierra está rodeada por todos lados de un cuerpo excesivamente elástico y enrarecido, llamado atmósfera, que se extiende con densidad decreciente en el espacio hasta una distancia desconocida, pero presionando la tierra con una fuerza igual a la de una atmósfera homogénea de cinco y media millas de altura. También está parcialmente rodeada de un océano de profundidad variable, que como se sabe es, en algunos lugares, de más de cuatro millas. Si la gravedad específica de la atmósfera y del océano fueran iguales en todas partes, todas las fuerzas de gravedad y de presión que actúan sobre cualquiera de sus partes, se equilibrarían perfectamente, y éstas se mantendrían para siempre en reposo. Pero como unas partes de la tierra son más calientes que otras, y aire y agua se dilatan y enrarecen al aumentar su temperatura, sus gravedades específicas no son iguales en todas partes de la tierra, destruyéndose así el equilibrio, y produciéndose un sistema de vientos y corrientes. ... Me propongo investigar en este ensayo los efectos producidos, tanto en la atmósfera como en el océano, por esa perturbación del equilibrio, y trataré de explicar, mediante una nueva fuerza que nunca ha sido tomada en cuenta en ninguna teoría de vientos y corrientes, ciertos fenómenos en sus movimientos, que no han dejado de ser un enigma en meteorología e hidrología.

Ferrel ignora los viejos trabajos de aquellos que introdujeron una componente de la "nueva fuerza", e incluso parece desconocer los trabajos de Simeon-Denis Poisson (1781-1840) y Gustave Gaspard Coriolis (1792-1843) publicados una veintena de años antes. Pero la gloria de haber recalcado e investigado teóricamente la importancia de la nueva fuerza de Coriolis para las grandes corrientes aéreas y marinas le pertenece completamente a él. Sus trabajos publicados hacia 1860 marcan definitivamente el comienzo de una nueva era en meteorología, la era de la meteorología dinámica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

d'Alembert, Jean Le Rond. 1747: *Réflexions sur la cause générale des vents*. 224 pp. Haude & Spener, Berlín.

Bernoulli, D. 1747: *Recherches physiques et mathématiques sur la Théorie des vents réglés* Ver d'Alembert (1747), pp. 137-176. Reimpreso en Bernoulli (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. 729 pp. Birkhäuser Verlag, Basilea.

Demidov, S. S. 1989: *D'Alembert et la naissance de la théorie des équations différentielles aux dérivées partielles*. En: Emery y Monzani (1989), pp. 331-350.

Emery, M. y P. Monzani. 1989: *Jean d'Alembert. Savant et Philosophe. Portrait à plusieurs voix*. 508 pp. Gordon and Breach Science Publishers S.A., Glasgow.

Euler, L. 1986: *Correspondance. Briefwechsel. Opera Omnia, Series quarta, Vol. 6*. 454 pp. Birkhäuser Verlag Basilea.

Euler, L. 1996: *Commentationes mechanicae et astronomicae ad physicam cosmicam pertinentes. Opera Omnia, Series secunda, Vol. 31*, Birkhäuser Verlag Basel, 378 pp.

Ferrel, W. 1856: *An essay of the winds and the currents of the ocean*. Nashville J. Medicine and Surgery, 11, 287-301. Reimpreso (1882) en: *Popular essays on the movements of the atmosphere*. Professional Papers of the Signal Service No. XII, 7-19.

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*. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 16, 153-168.

Kleinert, A. 1989: *D'Alembert et le prix de l'Académie de Berlin de 1746*. En Emery y Monzani (1989), pp. 415-431.

Laplace, P.S. 1778: *Recherches sur plusieurs points du système du monde*. Mém. Acad. Roy. Sci. Paris, 75-182. (Reimpreso en *Oeuvres complètes de Laplace*, Vol. IX, 1893, p. 71 ff.)

v. Lindenau, B.A. 1806: *Beyträge zu einer Geschichte merkwürdiger Winde*. (Contribuciones a una descripción de los vientos notables.) *Monatliche Correspondenz*, XIII, 32-44, 249-273, 455-452.

v. Lindenau, B.A. 1807: *Beyträge zu einer Geschichte merkwürdiger Winde*. (Contribuciones a una descripción de los vientos notables.) *Monatliche Correspondenz*, XV, 40-68.

Lorenz, E. 1967: *The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere*. 161 pp. World Meteorological Organization, Ginebra.

Mariotte, E. 1686: *Traité du mouvement des eaux et autres corps fluides*. Michallet, 390 (408) pp. Traducción al inglés por Desaguliers, en 1718 (reimpresa en 1978).

Mikhailov, G.K. 2002: Introduction to Daniel Bernoulli's papers on geophysical fluid dynamics and barometrical studies. En Bernoulli (2002).

Mylius, G. 1747: Versuch einer Bestimmung der Gesetze der Winde, wenn die Erde überall mit einem tiefen Meer bedeckt wäre. (Intento de determinar las leyes de los vientos si la Tierra estuviera totalmente cubierta por un océano profundo.) En d'Alembert (1747). Pp.137-224. Reimpreso en Bernoulli (2002).

Pelkowski, J. 2004: La anemología kantiana: contexto histórico y versión castellana. *Meteorología Colombiana*, No. 8, 115-127.

Ripa, P. 1996: La increíble historia de la malentendida fuerza de Coriolis. 100 pp. Fondo de Cultura Económica, México.

Séneca, L.A. [1979]: *Cuestiones naturales*. Traducción de Carmen Codoñer Merino. 2 tomos. Colección Hispánica de Autores Griegos y Latinos, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.

Truesdell, C. 1975: *Ensayos de historia de la mecánica*. (Traducción de *Essays in the History of Mechanics*, publicada en 1968.) 343 pp. Editorial Tecnos, Madrid.

Winter, E. 1957: *Die Registres der Berliner Akademie der Wissenschaften. 1746-1766*. (Actas de la Academia de Ciencias de Berlín, de 1746 a 1766.) 393 pp. Akademie Verlag, Berlín.

Yuskevic, A.P y E. Winter. 1961: *Die Berliner und die Petersburger Akademie der Wissenschaften im Briefwechsel Leonhard Eulers*. (Correspondencia de L. Euler.) Part II, Akademie-Verlag, Berlín, 463 pp.

Yuskevic, A.P. y E. Winter. 1965: *Leonhard Euler und Christian Goldbach, Briefwechsel 1729-1764*. (Correspondencia entre Euler y Goldbach). 420 pp. Akademie-Verlag, Berlín.