

CICLONES Y TEMPESTADES

Herrmann Von Helmholtz

Traducción de Joaquín Pelkowski

Profesor Asociado, Departamento de Geociencias. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia

FUENTE: Helmholtz, H von. 2000: *Ciclones y Tempestades*. Traducción de Joaquín Pelkowski. Meteorol. Colomb. 2:121 130. ISSN 0124 6984. Bogotá, D.C. Colombia.

TRABAJO ORIGINAL: *Wirbelstuerme und Gewitter*. Vortraege und Reden, Tomo 2, 1884, Fr. Vieweg und Sohn, Braunschweig.

Llueve cuando quiere llover, y la lluvia sigue su derrotero; y cuando basta de lluvias, se termina el aguacero.

Este versículo —no recuerdo de dónde lo tomé—¹ se prendió de mi memoria desde hace mucho tiempo, aparentemente porque atañe un punto vulnerable en la conciencia del físico, y, aunque difícil de sacudir, es como un escarnio que no deja de acertar, pese a toda la reciente comprensión que sobre la conexión entre los fenómenos naturales se ha logrado, y pese a todas las nuevas estaciones meteorológicas que se han instalado y un sinnúmero de series de observaciones realizadas. Bajo la misma bóveda celeste, donde deambulan los eternos astros como el símbolo de una regularidad invariable de la naturaleza, se hacinan las nubes, se precipita la lluvia, se mudan los vientos, representando, por así decirlo, en el extremo opuesto, los procesos naturales que evolucionan lo más caprichosamente posible, evadiendo, fugitivos e inasibles, nuestros esfuerzos por someterlos al yugo de la ley. Cuando el astrónomo descubre que su cálculo de un eclipse solar que tuvo lugar 600 años antes de Cristo, está equivocado en una hora y un cuarto, el desacierto le revela influencias hasta entonces no conocidas, como la del efecto de las mareas sobre el movimiento de la Tierra y la Luna, mientras que el navegante surcando remotos mares controla su reloj de acuerdo a los instantes en que Júpiter eclipsa a sus satélites. Si, al contrario, se le pregunta a un meteorólogo qué tiempo hará el día siguiente, la respuesta evoca al «hombre que inventó el si y el pero» de Buerger, y se comprende bien el que la gente en esas ocasiones prefiera fiarse de los pastores y marineros, a quienes más de una lluviosa tempestad inculcó el afán de interpretar los signos del tiempo².

Es verdad que hemos progresado en los últimos siglos, tras investigaciones sobre la soberana regularidad de la naturaleza, hasta tal punto, que no solemos ya culpar al «amontonador de nubes y arrojador de truenos», Zeus, Júpiter, como el instigador de todo buen y mal tiempo, sino que profesamos, in abstracto, la convicción de que se trata solamente de un juego de fuerzas físicas bien conocidas: presión del aire, calor, evaporación y condensación del vapor de agua. Pero cuando de traducir nuestra abstracción a algo concreto se trata, cuando hemos de inferir el estado meteorológico que reinará en un lugar específico por espacio de una semana, partiendo de un conocimiento de las fuerzas involucradas —conocimiento adquirido penosamente, y verificado como exacto y seguro en un millar de aplicaciones científicas y técnicas—,

nos sentiremos tentados a aplicar un proverbio alemán —pero prefiero el más comedido adagio latín “hic haeret aqua”³.

¿Por qué será así? Es esta una pregunta que, además de la importancia que la solución de los enigmas meteorológicos tendría para el navegante, el agricultor y el viajero, presenta un desafío para la teoría del conocimiento científico en general. ¿Es posible encontrar razones para explicar que el rebelde y anticientífico demonio del azar pueda defender todavía ese campo contra el dominio de la eterna ley, el cual es al mismo tiempo el dominio del pensamiento racional? ¿Y cuáles serían esas razones?

Una mirada a un mapamundi nos revela, en primer lugar, una causa de las complicaciones extraordinarias de los procesos meteorológicos: la extremadamente irregular distribución de mares y tierras, y las igualmente irregulares elevaciones en el interior de éstas. Teniendo en cuenta que la radiación solar incidente calienta un suelo seco sólo en sus capas más superficiales, aunque fuertemente, y que penetra en el agua hasta mayores profundidades, calentándola menos fuertemente, pero afectando una masa más extensa, y que la tierra calentada exhala poco y el agua calentada mucho vapor, y si a esto se suma que las distintas coberturas vegetales, respecto a su color y tipo —suelos terrosos o pedregosos— influyen fuertemente en el calentamiento de las capas aéreas contiguas, se puede entender sin más que no es una tarea fácil, la de calcular los efectos producidos por todas estas interacciones, aun cuando pudiéramos pormenorizar el efecto térmico de cada pie cuadrado de la superficie terrestre.

Aunque un tal cálculo no sea realizable todavía, cabe esperar que, como se ha logrado en el problema de las mareas, la observación durante uno o más años, del comportamiento del tiempo atmosférico, permita sacar conclusiones acerca del tiempo en los años restantes. También pleamar y bajamar son mantenidas por fuerzas regularmente variables, las atracciones del Sol y la Luna, y también en ese caso impide la forma irregular de los mares el cálculo teórico de la altura de la marea para cada punto de la costa. Sin embargo, bastan algunas pocas observaciones en un punto dado, para calcular con suficiente precisión la evolución de la marea, su hora y altura. Se precisan sólo dos magnitudes en un lugar, la altura de la marea en el plenilunio o en la luna nueva, y el tiempo que demora la llegada de la luna al meridiano, que se determina por observación, para poder calcular completamente las tablas de marea para el lugar en cuestión, tal como se hace en los puertos más importantes, donde se entregan a los navegantes, y en las que incluso se basan los itinerarios de los barcos a vapor.

¿Por qué se comporta el tiempo de otra manera, ya que el sol actúa cada año de la misma forma sobre las mismas superficies de tierra y agua? ¿Por qué no suscitan las mismas causas, aparentemente bajo las mismas condiciones, cada año los mismos efectos?

Para delimitar correctamente esta pregunta, hemos de percatarnos de que no en todas partes de la Tierra el tiempo es tan caprichoso como aquí⁴. En la zona tórrida es generalmente mucho más regular. En el Atlántico, desde las Islas Canarias hasta el ecuador, predominan, año tras año, los uniformes alisios del noreste, bajo un cielo azul, y el navegante, al garette bajo ese cielo, se deja llevar fácil y seguramente a Centroamérica. Los españoles llamaban por ello a esta parte del océano “el Mar de las Damas”⁵. Algo análogo ocurre en la mayoría de los mares de la zona tórrida. En la América tropical se invita a venir el día siguiente «después de la tormenta», tan seguros

están de que ésta tenga lugar en la tarde. Incluso en la Europa meridional los meses intermedios del verano están casi exentos de perturbaciones, y reinan vientos estivales del noreste, el etesio de los griegos, ya descrito por Aristóteles; como también Nearcos [Nearchos], almirante del Alejandro macedónico, quien, en sus expediciones bélicas, basó su estrategia en la mudanza regular del monzón del Océano Índico.

Pero también en aquellas zonas con estaciones en que el tiempo se distingue por ser particularmente veleidoso, es posible identificar un resto de regularidad en medio del violento juego del azar. Puede darse ocasionalmente aquí, en verano, el que sendos días sean fríos, con temperaturas menores que en algunos días excepcionalmente cálidos en enero; no obstante, podemos estar seguros de que la temperatura media en cada verano es más alta que la media en cada invierno. Las irregularidades desaparecen, si para un cierto lugar tomamos los valores medios, derivados de períodos más largos o de un número mayor de años. Así es que de hecho los meteorólogos han intentado determinar, a partir de largas series continuas de observaciones, promedios de temperatura, niveles barométricos, cantidades de lluvia, direcciones de viento, para una serie de estaciones y para los distintos meses, o para períodos más breves de cinco días, con el fin de separar la parte regular de los fenómenos, de sus partes irregulares.

Me permito evocarle al lector esta componente regular de los movimientos, puesto que más adelante precisaremos de su conocimiento, y cuyas circunstancias causales, por lo demás, no es difícil de descubrir en general. La Tierra recibe su calor de los rayos solares, los cuales se distribuyen irregularmente sobre su superficie, actuando con gran intensidad en la vecindad del ecuador, donde hacia mediodía inciden casi verticalmente, y, en cambio, siendo débiles en los polos, donde el sol no asciende nunca mucho sobre el horizonte. Por otro lado, la Tierra pierde su calor por emisión hacia el espacio frío, de manera casi uniforme, de todas las partes de la superficie, como también parcialmente de la atmósfera. Y es por ello que la vecindad del ecuador constituye la zona tórrida; allí es donde el aire se calienta más, se expande y se hace por consiguiente más liviano. En las zonas gélidas alrededor de los polos es donde más se enfría la superficie terrestre, y donde se torna más denso y pesado el aire que se encuentra encima. El aire en la zona fría, por lo tanto, desciende, por ser más pesado, y se derrama a ras del suelo, lo que sólo puede hacer dirigiéndose hacia el ecuador. El aire de la zona tórrida, en cambio, asciende, y se extiende en altura, es decir, se desparrama hacia los polos. Como el aire que se dirige hacia el ecuador, al llegar a las zonas más calientes, se calienta y asciende, mientras que el aire que regresa en altura, apenas llega a los lugares con suelos más fríos, se enfría y desciende, resulta una circulación continua de la masa entera de la atmósfera, la cual es predominantemente hacia el ecuador en superficie, y del ecuador al polo, en altura. Las mismas causas provocan, sobre la llama de cualquier vela o lámpara, en el interior de un horno prendido, un ascenso del aire, el cual induce, en cada habitación calentada, una circulación del aire, con aire que asciende sobre el horno, fluye a lo largo del techo hasta la pared con ventanas, para descender a lo largo de ésta y volver por el suelo al horno.

En la atmósfera, la dirección de estas corrientes es considerablemente modificada, debido a la rotación diaria de la Tierra alrededor de su propio eje. Este movimiento le imparte a cada punto del ecuador una velocidad de 463 metros por segundo, en dirección Oeste a Este; por contraste, los paralelos de mayor latitud geográfica tienen menor velocidad Oeste-Este, en la medida en que su radio es menor que el del ecuador. En una latitud de 60°, en San Petersburgo y Estocolmo, esta velocidad no es sino la

mitad de la del ecuador; pero incluso esta mitad es todavía igual a la velocidad de una bala de cañón disparada.

Si ahora consideramos un anillo de aire originalmente en reposo sobre un paralelo de cierta latitud, es decir, que comparte su movimiento de rotación, y lo desplazamos uniformemente hacia el ecuador, abarcará paralelos de mayor circunferencia y, por ende, de mayor velocidad Oeste-Este. Tal anillo tiene que extenderse, de modo que su radio, o distancia al eje de rotación, aumenta. La ley mecánica que determina en estas circunstancias el cambio de la velocidad de rotación de dicho anillo es la que se conoce como el principio de la conservación del momento angular. En la descripción del movimiento de los planetas es conocida como la primera ley de Kepler, y se enuncia diciendo que el radio vector, o sea, la línea que conecta un planeta con el Sol, barre en tiempos iguales áreas iguales. También se puede enunciar más convenientemente para nuestra aplicación presente así: la proyección de la velocidad de un planeta en dirección del movimiento circular alrededor del Sol, es inversamente proporcional a su distancia a éste.

Esta misma ley es válida para el movimiento rotatorio de todos los cuerpos alrededor de cualquier eje, cuando las fuerzas que actúan sobre ellos están dirigidas hacia o desde el eje. Un ejemplo mecánico muy sencillo se consigue con una cuerda, en cuyo centro se ajusta un cuerpo pesado, preferiblemente una esfera perforada, y luego se estira verticalmente, sujetando sus extremos con ambas manos. Aflojando la cuerda en esa posición, es fácil hacer bailar la esfera en un círculo horizontal. Al jalar los extremos de la cuerda, la esfera se ve obligada a acercarse al eje de su círculo de rotación, y se puede comprobar una aceleración a medida que los círculos se hacen más angostos.

Aplicando esto a nuestro anillo aéreo, se sigue que su velocidad Oeste-Este, al acercarse al ecuador atravesando paralelos de mayor velocidad longitudinal, disminuye a medida que el anillo se ensancha. Nuestro anillo tiene que rezagarse en su progresión meridional, en relación a aquellos puntos de la superficie terrestre que van quedando por debajo, es decir, desde estos puntos, el anillo aparece como un viento del Este. Por el contrario, las masas procedentes del ecuador, donde tienen una mayor velocidad de rotación, y que fluyen hacia los polos, adquirirán un movimiento Oeste-Este más rápido que los paralelos a los cuales acuden, o sea, aparecen como vientos del Oeste. Por otra parte, después de algún tiempo, las diferencias de movimiento se anulan, al menos en la parte inferior del anillo, en virtud de la resistencia que cada uno de dichos anillos sufren, debida a la fricción con la superficie, árboles, casas y montañas, lo cual modera considerablemente la vehemencia de los vientos con componentes zonales de velocidad.

Sobre los mares de las zonas tórridas aparecen esas corrientes, menos perturbadas, como vientos conocidos como los alisios. Los alisios inferiores constituyen la corriente polar que se dirige hacia el ecuador; aparece en el hemisferio norte como viento del nordeste, y en el hemisferio sur como vientos del sureste. Los alisios superiores, que se pueden observar en sendos picos altos, como el Pico de Tenerife, el Mauna Kea de las islas Sandwich, y que ocasionalmente se delatan por transportar cenizas volcánicas, fluye en dirección exactamente opuesta.

Los ponientes giran más rápido que el paralelo debajo de ellos, y más lentamente los vientos de levante, de modo que la fuerza centrífuga de los primeros es mayor y hace que empujen más hacia el ecuador que los últimos. Por consiguiente, el aire de los

alisios, antes de ascender, tiene que haber ajustado su movimiento al del suelo casi totalmente, es decir, que para el observador en reposo, prevalece la calma, y sólo así puede superar la fuerza centrífuga de los vientos del oeste que reinan en altura y contener las masas de aire, obligándolas a retroceder hacia el polo⁶. Así se forma cerca del ecuador la zona de las calmas ecuatoriales entre ambas fajas de los alisios.

Inversamente, como ya se dijo, se acrecienta el movimiento de rotación de los vientos del oeste superiores, y con ella la fuerza centrífuga, a medida que son rechazados hacia paralelos cada vez más angostos. En el polo mismo llegarían ambos a ser infinitos, si no fuera porque la fricción y las resistencias debilitaran su movimiento. Ahora, las investigaciones recientes sobre la magnitud de la fricción aérea muestran que en el seno de tan extensas masas, como las que estamos tratando aquí, la disminución de las velocidades de distintas capas, en virtud a la fricción, es extremadamente lenta. Sólo la resistencia del suelo acarrea una disminución rápida de la velocidad. Todos conocen la violencia de la tempestad que pasa raudamente sobre la superficie libre de los mares y sobre grandes extensiones de tierra plana, y la intensidad que puede llegar a tener sobre torres y picos aislados, mientras que en las calles de las ciudades, en los bosques y entre colinas es soportable.

Es así que nuestros vientos del oeste, tras haber ascendido a las capas superiores conservando su velocidad ecuatorial, y ante una fuerza centrífuga creciente que les impide llegar a latitudes mayores, además de estar expuestos al reiterado empuje de masas ascendentes con rotación más rápida, y que por lo demás se van enfriando paulatinamente, cobran peso, e invaden finalmente, en las latitudes medias, el espacio hasta el suelo, creando así dos franjas de vientos preponderantemente del oeste. Entre estas zonas y el ecuador quedan las zonas de los alisios. Sus límites fluctúan según la posición del sol. En verano los alisios se extienden incluso hasta el sur de Europa, formando el etesio, ya mencionado, de Grecia. En invierno, retroceden hasta las islas Canarias. Nosotros, por el contrario, nos encontramos en la zona de los ponientes descendentes, los cuales se manifiestan en superficie como vientos del suroeste; allí pueden mermar su velocidad, y como consecuencia, desviarse hacia los polos.

Mas la zona de los ponientes frecuentemente es interrumpida por corrientes de aire frío, procedentes del polo. Puesto que, como decíamos, las capas inferiores de los vientos del oeste acrecientan paulatinamente las masas de aire polar, mientras que las superiores se nutren de las del ecuador, ocurre que de vez en cuando y en puntos particulares del anillo, la masa de aire de la zona fría, grávida por enfriamiento y acumulación, empuja la capa de los ponientes hacia arriba, soplando como un viento del noreste, frío y seco sobre las latitudes medias, rellenando así el depósito de los alisios. El que las eternas alteraciones de nuestro tiempo atmosférico estriben en el mutuo desalojamiento de vientos, unos polares, fríos y secos, y los otros ecuatoriales, cálidos y húmedos, ha sido investigado y demostrado tenaz y minuciosamente, en particular por Dove⁷. Cuáles son las circunstancias mecánicas que causan, en mi opinión, el desalojamiento, fue lo que intenté detallar anteriormente. Por lo demás, este sistema de vientos sufre múltiples perturbaciones locales, a consecuencia de las montañas, que se oponen a la corriente, así como a raíz de las temperaturas distintas de suelos y mares. Aquellos son más calientes en el verano, lo cual provoca corrientes ascendentes, y viceversa en invierno, por lo que el sistema general de vientos descrito más arriba sufre varias dislocaciones e interrupciones.

Finalmente, hemos de mencionar la circulación del agua en la atmósfera. El aire más caliente puede admitir más exhalaciones acuosas que el aire frío. Por exhalaciones acuosas se ha de entender aquí siempre agua puramente gaseosa, la cual es completamente transparente como el aire. Sólo cuando se enfría el aire que contiene las exhalaciones, es que se segrega la exhalación en forma de niebla, es decir, como agua fluida, esparcida a manera de polvo. Las masas neblinosas suspendidas en lo alto de la atmósfera las percibimos como nubes. Un enfriamiento capaz de precipitar la exhalación acuosa en forma de niebla ocurre, entre otras, cuando el aire cargado de exhalaciones se expande fuertemente, al estar sujeto a menores presiones, ya que todos los gases se enfrían al dilatarse. Si la niebla es abundante, las finas partículas del polvo acuoso suspendido se reúnen para conformar gotas más grandes que caen rápido, lo que constituye la lluvia. Esto tiene lugar, por ejemplo, en el aire que yace sobre la zona de las calmas de los mares tropicales, cuando, saturadas de vapor y calor, empiezan a ascender, para iniciar su sendero como alisios superiores, de regreso hacia los polos. Esto tiene por consecuencia los aguaceros tropicales antes mencionados, los cuales suelen tener lugar en las estaciones de mayor altura solar.

Es de suponer que, tan pronto haya sido aliviado el aire de su carga lluviosa, antes que nada asciende rápidamente, excediendo en mucho, con la velocidad adquirida, su posición de equilibrio, dilatándose y enfriándose transitoriamente tanto, que pierde mucha de su agua, pudiendo así salvar un largo trecho como parte de los alisios superiores, antes de que se ocasionen nuevas precipitaciones, al sufrir un enfriamiento por radiación hacia el espacio estelar y por contacto con regiones más frías. Las precipitaciones tienen lugar en el límite de la zona de los alisios, y se conocen como las lluvias subtropicales. En nuestro invierno caen al sur de Europa, cruzan en primavera a Alemania en un movimiento hacia el norte, para regresar en otoño. En nuestras latitudes, por consiguiente, son generalmente los vientos del oeste, es decir, las corrientes ecuatoriales que han descendido, las que traen las lluvias.

Este es, a grandes rasgos, el gran sistema de la circulación regular del aire y el agua en la atmósfera terrestre, persistentemente mantenida por la diferencia constante de temperaturas entre la zona fría y la cálida. Existen, como ya lo había aducido, extensas zonas sobre la superficie terrestre, donde la regularidad de estos procesos apenas es perturbada; tanto más conspicua es la vehemencia o frecuencia de las perturbaciones en otros lugares. Estas perturbaciones son más instructivas y claras cuando interrumpen ocasionalmente el comportamiento regular de los procesos meteorológicos en la zona tórrida. Allí, el mecanismo de su génesis y el juego de las fuerzas desatadas mientras dura su ciclo, es relativamente transparente, por cuanto no hay un engranaje de causas perturbadoras demasiado complicado, como es el caso en zonas más templadas.

Estos movimientos del aire que interrumpen la regularidad del tiempo tropical son los conocidos huracanes o ciclones tropicales. Se trata de tempestades de una violencia aterradora, que suelen estallar preferentemente en ciertos lugares de los mares tropicales. Los que logran agobiar también a Europa, tienen su origen en la parte tropical del mar Atlántico, la mayoría de las veces cerca de las Antillas; pero también los océanos Indico y Chino tienen mala fama por sus huracanes. No es el menor de los grandes méritos de Dove en cuanto a la meteorología, el de haber descubierto la forma vortiginosa de esas tempestades, con ocasión de la investigación de una de ellas, que había atravesado a Europa en la Navidad de 1821; sus ideas al respecto, publicadas en 1828, fueron confirmadas posteriormente, mediante investigaciones realizadas por Redfield (1831) y

Reid (1838)⁸, de los ciclones tropicales de las Indias orientales; hoy es un hecho universalmente reconocido.

En el centro de un tal ciclón se halla, por regla general, un espacio de lánguidos movimientos del aire, o incluso de calma total; probablemente se da esta calma casi siempre al principio, mientras que a medida que se propaga la tempestad arrastra gradualmente al centro inmóvil. Este centro tiene, en los huracanes más grandes, un diámetro de 3 a 7 millas geográficas, y se distingue por un nivel barométrico muy bajo; a veces la diferencia entre el centro y la periferia de la tempestad asciende a pulgada y media, pudiendo llegar hasta dos pulgadas y tres cuartos. Es esto señal de que la masa en el interior del vórtice disminuye considerablemente, o, por decirlo así, es succionada.

En torno a este centro en calma, circulando a su alrededor, reina, en cambio, la tempestad más vehemente. El diámetro de estos círculos tempestuosos alcanza a veces hasta 250 millas geográficas, e incluso aquella parte del huracán, en la que el viento es tan vehemente que los marinos se ven obligados a recoger las velas, puede llegar a tener un diámetro de 100 millas. La dirección de rotación de los ciclones tropicales más grandes cumple una ley. Circulan, en el hemisferio norte, alrededor del centro en la dirección que lleva de norte a oeste, sur, este y nuevamente al norte. En el hemisferio sur, por el contrario, circulan en la dirección exactamente opuesta. O dicho de otra manera: la tempestad tiene la misma dirección de rotación que el suelo del hemisferio donde ocurre. El lado de la tempestad hacia el ecuador indica siempre viento del oeste. La dirección del viento no es, empero, puramente circular, sino al mismo tiempo se inclina un tanto hacia el centro por debajo, mientras que arriba, nubes extrañamente desfleadas indican una corriente hacia afuera.

La cólera que desarrollan estas tempestades cerca de su lugar de origen en los mares tropicales, es indescriptible; para nosotros los europeos, es imposible concebir algo análogo. En un lugar de las Antillas, por ejemplo, hacia el cual se acerca el centro, se percibe inicialmente la formación de un banco aciago de nubes, que se tornan cada vez más oscuras, elevándose; acto seguido se levanta un viento del este cada vez más fuerte, las nubes descienden más y más, descargándose en tremendos aguaceros con incontables rayos llameantes. El levante se intensifica gradualmente a lo largo de las siguientes horas, hasta alcanzar una temible intensidad. Cuando entonces llega el centro con su calma chicha, su aire bochornoso y su lóbrega cubierta de nubes, se crea una pausa. Pero los habitantes de las Indias occidentales ya saben que se trata de una calma engañosa y efímera. Al poco rato se acerca el otro lado del vórtice; repentinamente, se desata una violenta tempestad occidental, la cual perdura por espacio de algunas horas, amainando finalmente poco a poco. Al final brilla el sol nuevamente desde su cielo azul sobre el teatro de la desolación.

Las devastaciones causadas por una tempestad, su bramido, su violencia mecánica, son formidables. En particular la vegetación es destruida "como si fuego hubiese corrido por la tierra, quemando y chamuscando todo". La mayoría de los árboles son derribados, y los que se mantienen en pie, son despojados de sus hojas. Casas quedan destechadas, tumbadas algunas. En Saint Thomas, en 1837, una casa recién construida fue arrancada de sus fundamentos y fue a parar a una calle; los cañones de 24 libras del fuerte portuario, se vieron lanzados de sus anclajes en las murallas. En 1831, en la isla de Barbados, un oficial inglés, quien había buscado seguridad debajo de un arco de ventana en la planta baja, no pudo oír, en medio del rugido de la tempestad, que a su espalda la

casa se estaba desplomando. Por supuesto que los barcos también sufren cruelmente, incluso los que están atracados en los puertos, pues se despedazan o se hunden. Los que se encuentran en alta mar tienen que procurar evitar el interior del vórtice; pero cuando la vehemencia de la tormenta es tal, que no se pueden exponer las velas a sus vientos, con el fin de mantener cierto rumbo, no les queda otro remedio que entregarse a aquellos. Piddington⁹ describió el camino del bergantín inglés Charles Heddie, que estuvo a merced de una tempestad en el mar Indico durante cinco días, circulando alrededor del centro cinco veces en espirales cada vez más estrechas. Bastante devastadora es también el alza del nivel del mar, causada por la tempestad, ora inundando rápidamente la tierra, ora internándose muchas millas tierra adentro, salpicando espumas y matando plantas y peces.

Desgraciadamente, no es raro que las víctimas asciendan a millares, con navegantes entre ellas, pero también habitantes de tierra firme, sepultados por casas que se derrumban o árboles desarraigados, o aun arrastrados por la marea viva. Estos poderosos vórtices aéreos no son estacionarios donde se forman, sino que avanzan en forma bastante regular. Su origen parece ubicarse entre los 10 y 20 grados de latitud, o sea muy cerca del ecuador y la zona de las calmas ecuatoriales. Luego se alejan del ecuador, al principio cortando de través la dirección de los alisios, los vórtices septentrionales marchando hacia el noroeste y los meridionales hacia el suroeste. Una vez arribados a la frontera de los alisios, toman una dirección más hacia el este. Los del Atlántico septentrional, por ejemplo, siguen en su marcha la dirección de la cadena de islas de las Indias occidentales, hasta la región de la Florida, avanzando cuatro o cinco millas geográficas por hora, para luego barbear casi paralelamente la costa de los Estados Unidos, pero alejándose, más al norte, gradualmente de ella, y cruzan el océano Atlántico para encaminarse hacia el norte de Europa, progresando a una velocidad de unas 6 a 8 millas por hora. En términos medios se toman unos 10 a 12 días para semejante viaje, que los lleva de las Indias occidentales a Europa. Durante este tiempo se embotan paulatinamente su violencia, el centro comienza a participar del movimiento vortiginoso, y el diámetro del vórtice se agranda. Con todo, siguen siendo suficientemente peligrosos para los barcos en los mares europeos, y ocasionalmente derriban árboles y destapan casas. Pero respecto de los peligros de esta clase, a los que están expuestos los barcos a lo largo de las costas europeas, cabe esperar que un sistema regular de telegrafía meteorológica permita alertar a tiempo acerca de la inminente tempestad.

No profundizaré en la descripción de fenómenos individuales, puesto que para nuestro objetivo especial sólo interesan las partes de todo el proceso que recurren con regularidad. Una visión panorámica de tales fenómenos, muy expresiva y completa, hasta los tiempos más recientes, ha dado el Señor Th. Reye¹⁰, profesor en Estrasburgo, en su libro que apareció en 1872, titulado «Ciclones tropicales, tomados y trombas».

Pasemos ahora a considerar la pregunta de cómo las débiles diferencias de presión atmosférica, causadas por fluctuaciones de temperatura, y que se manifiestan normalmente como insignificantes diferencias en los niveles del barómetro, pueden ser capaces de provocar tan temibles descargas y tan violentos movimientos. Precisamente el citado libro de Reye constituye un progreso considerable hacia la respuesta a esta pregunta, y cuyo autor, por lo demás, nos permite entrever la naturaleza fluctuante de los fenómenos del tiempo.

Para ello es esencial considerar el concepto del equilibrio inestable. Si asimos una barra en uno de sus extremos, dejándola colgar, la gravedad hace que su centro de gravedad esté lo más bajo posible; la barra pendiente se configura verticalmente y en tal posición está en un equilibrio estable. Si la empujamos a un lado u otro, regresa siempre a su posición vertical original, lo cual caracteriza un equilibrio estable. Si, por otro lado, intentamos colocar la barra sobre su punta inferior, de tal forma que su centro de gravedad se encuentre exactamente sobre la vertical encima de la punta, debería existir una posición en la que la gravedad tira tanto de un lado como del otro, hacia el observador o alejándolo de él, sin que por ello existiera una razón suficiente para caer hacia uno u otro lado. Pero si se lograra sostener por un instante tal estado, conocido en mecánica como equilibrio inestable, el aliento más ínfimo, la conmoción más minúscula del punto de apoyo bastaría para causar un sobrepeso hacia algún lado. Tan pronto la barra se haya desviado una pizca hacia algún lado, la gravedad lo hala con creciente velocidad por ese lado hacia abajo. La verificación práctica del principio de la razón suficiente falla igual que en el caso del asno de Buridán, que vacila entre dos pesebres. Lo característico del proceso es que la más ínfima fuerza o movimiento hacen que la barra se dirija hacia uno u otro lado, chocando finalmente, con toda la fuerza de su caída, contra cuantos objetos se encuentren en su dirección.

Ambas especies de equilibrio pueden también tener lugar cuando dos líquidos de distinta densidad se vierten en un receptáculo, uno sobre el otro. Aceite sobre agua se halla en equilibrio estable; la superficie limítrofe se pone en una posición horizontal. Si mediante alguna perturbación llega a ascender un poco de agua en el aceite, inmediatamente volvería a descender el agua, más pesada que el aceite, y viceversa: aceite impulsado hacia abajo reascendería. Pero agua sobre aceite con una interfaz perfectamente horizontal representaría un equilibrio inestable, puesto que la interfaz tendría exactamente la misma presión en cada uno de sus puntos, y no habría necesidad de ceder en un punto antes que en otro. Pero tan pronto el aceite se eleve en algún punto, haciendo bajar en otro el agua, tendría que ascender el aceite, siendo más liviano, y descender el agua, que es más pesada.

Ahora, aire que contenga una mayor cantidad de calor se comporta, respecto al aire con menos cantidad de calor, como el aceite y el agua del ejemplo anterior. Donde ambos estén yuxtapuestos bajo la misma presión, el aire más liviano asciende. De paso observemos que, si ambos ascendiesen conjuntamente, al dilatarse se enfriarían. Un equilibrio estable sólo sería posible si el aire con más calor se encontrase encima del que tiene menos calor. Yo no debería decir: «cuando la masa más caliente se encuentre sobre la más fría». Porque de hecho puede estar el aire con mayor calor, que subiendo se dilata y enfría, a una temperatura menor que el aire situado por debajo, con menos calor y por lo tanto de mayor densidad. Tan sólo cuando ambos estén yuxtapuestos a la misma altura y estén sometidos a la misma presión, correspondería la diferencia de sus temperaturas con una diferencia de sus contenidos en calor. Ahora, el aire es calentado principalmente en superficie, que absorbe los rayos solares, lo cual podría producir un equilibrio inestable. Pero como este calentamiento toma bastante tiempo, y un equilibrio inestable sólo perdura por breves instantes, se llega a un equilibrio rápido, a raíz del ascenso del aire. El movimiento vibrante del aire que se observa sobre suelos fuertemente caldeados, es una expresión de estas perturbaciones y de las resultantes corrientes de aire. Esto es así mientras las distintas capas de aire tengan una composición homogénea. Si por el contrario, se encuentran aire seco y aire húmedo, entonces, como lo ha demostrado el Señor Reye, se da la posibilidad de que se

acumulen grandes masas de aire, las cuales están originalmente en equilibrio estable, pero que, al variar lentamente las temperaturas, comienzan a perder su estabilidad, para finalmente transformarse aquél en un equilibrio inestable.

Según los cálculos del mencionado matemático, basados en la más reciente mecánica del calor y especialmente en un principio general establecido por el profesor Clausius¹¹, el aire neblinoso cede más fácilmente a cambios de presión que el aire seco. Cada masa de gas que es comprimida en un espacio más pequeño, se calienta, y por lo tanto ofrece mayor resistencia, ya que el calor aumenta su elasticidad, a la presión a la cual está sometida, que en el caso en que no hubiese habido cambio de temperatura. Un golpe rápido y fuerte sobre un émbolo que comprima el aire en un cilindro de marfil o de vidrio, puede calentar el aire hasta tal punto que inflama la yesca colocada en él. Tales encendedores son utilizados cotidianamente por los malayos, y en laboratorios de física se conocen bajo el nombre de encendedores neumáticos. Ahora, si en el aire comprimido están suspendidas gotitas de niebla, una parte del calor producido por la compresión se consume en el acto de transformar una parte de esta agua en vapor, puesto que más vapor acuoso puede mantenerse en el aire más caliente, pese a que su volumen haya sido reducido. Ahora, de los cálculos del Señor Reye resulta que el aumento del volumen ocasionado por la formación de vapor a partir del agua, es menor que la disminución del volumen debida a que parte del calor producido por la compresión la pierde el aire en la transformación del agua en vapor. Tal aire neblinoso no se calienta tanto en el proceso de compresión como el aire seco, y por lo tanto, cede más fácilmente ante un aumento de la presión.

Por el contrario, cuando se dilata aire neblinoso, se enfría, como todas las masas de gas que se dilatan. Pero el enfriamiento no es tan pronunciado como en el aire seco, porque una parte del vapor que contiene se condensa, y se agrega a la niebla en forma de polvo de agua líquida. Los vapores empero, que se reconvierten en agua, ceden otra vez el calor que fue empleado para formarlos a partir de ésta, y por ello no se enfría en la dilatación el aire neblinoso tanto como el seco. También en este caso la disminución del volumen debida a la condensación de parte de los vapores es menor que el aumento debido al calor liberado en el proceso, así que en total, el aire neblinoso se dilata más bajo una misma disminución de presión que el aire seco, siempre y cuando el aire no tenga oportunidad de recibir calor de afuera o de entregarlo hacia afuera durante el cambio.

Por medio de los procesos expuestos es posible entonces, si las masas de aire seco y húmedo se sitúan la una sobre la otra o se yuxtaponen, generar una especie de equilibrio de doble sentido. Aire neblinoso y aire seco (siendo el seco un poco más cálido) pueden tener temperaturas tales que a alturas medias en la atmósfera tengan apenas el mismo peso. Entonces será más denso el aire neblinoso en la mitad inferior de la atmósfera, donde la presión es mayor, y por consiguiente descenderá. En la mitad superior de la atmósfera, en cambio, el mismo aire neblinoso se dilatará más al disminuir la presión, tornándose más liviano, y por ello ascenderá.

Puede servir de modelo mecánico un cilindro de vidrio, cerca de medio metro de altura, el cual ha sido relleno con agua, y en el cual se coloca, bocabajo, un matraz de cristal en forma de botella, con alambre de plomo enrollado alrededor de su cuello, para que pese tanto que esté a punto de sumergirse. Si sobre el fondo plano del matraz se colocan unas cuantas pesas pequeñas, se puede lograr que el matraz se vuelva tan pesado como

el agua a media altura del cilindro. Se encuentra entonces, en esa posición, en equilibrio indiferente; tan pronto como suba un poco, el aire encerrado en él se dilata, con lo cual se aligera y asciende completamente. Pero si en cambio baja desde su posición media un poco, el aire encerrado se comprime más y se hunde por completo. El agua, en este ejemplo, menos compresible, se asemeja al aire seco y el matraz lleno de aire más dilatado es comparable a una masa neblinosa que flota en él.

Imaginemos ahora una masa de aire cálida que se extiende sobre millares de millas cuadradas, ubicada sobre uno de los mares tropicales que colindan con las calmas ecuatoriales, donde hay poco movimiento, y que está casi saturada de vapor. Sobre ella fluyen los alisios superiores, los cuales han precipitado la mayor parte de sus vapores en forma de lluvia en el momento exacto de su ascenso. El aire superior estará relativamente seco y rico en calor, por haber conservado el calor latente liberado en el acto de la precipitación. Supongamos que inicialmente el equilibrio fuese tal que, en la frontera intermedia de ambas capas de aire, la inferior, húmeda, sea la más pesada. Entonces el equilibrio es todavía estable, y semejante estado puede acabar de formarse tranquilamente y mantenerse por un buen tiempo. Si esto sucede en el límite de las calmas ecuatoriales, donde los alisios no arrastran demasiado rápido el aire, por la acción continua del sol, el aire inferior se torna cada vez más caliente y húmedo, y por ende también más liviano. El aire superior, en cambio, perderá más bien calor debido a la radiación hacia el espacio. Por consiguiente, poco a poco el equilibrio pasará a ser indiferente. E indiferente llegará a ser tan pronto como se igualen densidad y peso de ambas especies de aire, a la presión reinante en la interfaz. Pues entonces cada parte de la capa inferior que ascienda todavía un poco, tendrá que ascender completamente.

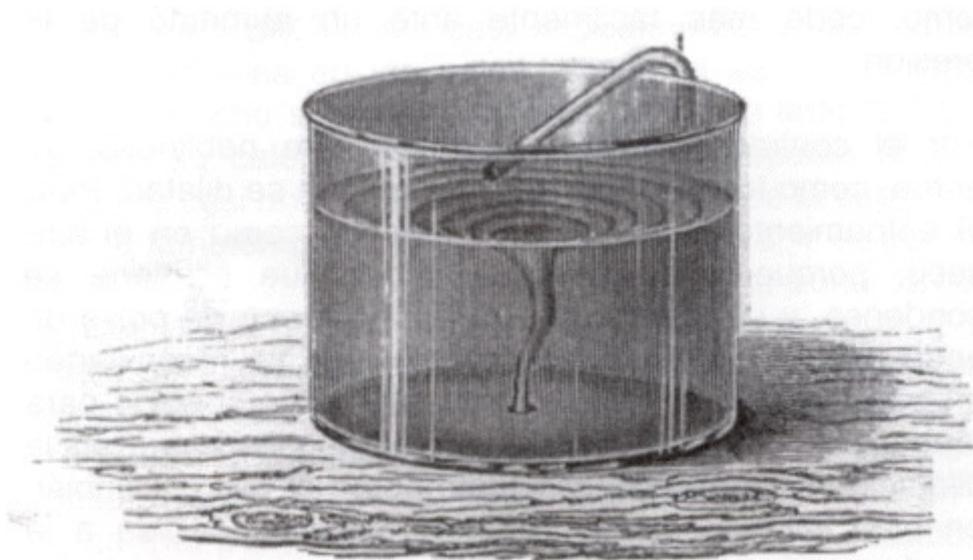
Si ahora se rompe en algún lugar el equilibrio y aire húmedo asciende formando niebla y precipitación de lluvias, disminuye allí la presión, porque el aire de las capas superiores, colmándose de aire neblinoso ascendente, se vuelve más liviano que antes y que el aire circundante, aún seco. Hacia el lugar en donde la presión ha disminuido, tiene que fluir de todos lados aire de capas inferiores, para ser a su vez arrastrado por la corriente ascendente, mientras que alrededor, donde el equilibrio era hasta entonces estable, se consolida la estabilidad aún más, debido a la evacuación de aire húmedo y la subsidencia del límite entre las capas, de modo que no será necesario que tenga lugar una nueva penetración. El aire ascendente, dilatándose fuertemente, se desparramará en las regiones superiores, o sea, se alejará de la dirección de penetración, lo que puede, como ya lo hemos señalado, observarse en el comportamiento de las nubes que se forman. El proceso entero llega a estancarse y a producir un nuevo equilibrio solamente cuando el aire superior, más seco, haya descendido lo suficiente para que el canal lleno de humedad ubicado en el centro del vórtice, que conecta el aire húmedo de las capas inferiores y el de las superiores que ya ascendieron, tenga en promedio aire del mismo peso que el del aire seco de las capas atravesadas. Eso podrá ocurrir con un cierto grado de sumergimiento, ya que el aire húmedo en profundidad es más denso que el seco¹² por lo menos si no ha descargado su agua en una lluvia. Pero como normalmente el peso del aire húmedo ascendente disminuye considerablemente, por cuanto la neblina acuosa en él se condensa suficientemente para caer como lluvia, cabe esperar que en la mayoría de los casos el ascenso no encontrará un límite antes de que toda la húmeda capa inferior no se haya elevado.

La masa de las capas inferiores de la atmósfera que ha sido atraída hacia el lugar de penetración tendrá que acusar, si es suficientemente extensa, un influjo apreciable de la

rotación de la Tierra. Imaginemos un anillo de aire de diámetro igual a 120 millas geográficas, cuyo centro coincide con el punto de penetración y el cual, angostándose poco a poco, es succionado por éste. Supongamos que su centro se sitúe en una latitud de 15° , región aproximada a la cual apunta la mayoría de las observaciones como el lugar de origen de los ciclones tropicales. Entonces su borde meridional estaría ubicado a la latitud de 7° , el septentrional a la de 23° . Ahora, el movimiento oeste-este de la Tierra en 7° es de aproximadamente 460 metros por segundo, y de 426 metros por segundo en la latitud de 23° . Semejante anillo, en reposo, tendría en su lado meridional una velocidad en 34 metros mayor en dirección oeste, y la diferencia sería aún más pronunciada, si tenemos en cuenta que el lado sur se encuentra dentro o cerca de la zona de las calmas, el lado norte en los vientos del poniente. Podemos interpretar el estado inicial del anillo como si en conjunto se trasladase con la velocidad media del centro (443 metros), pero girando con una velocidad de 17 metros por segundo alrededor de éste, en el sentido de la rotación terrestre. Es decir, un tal rosario tiene en su movimiento una proporción (una componente, matemáticamente hablando) de rotación que procede de la rotación terrestre, pero que ciertamente no es grande por estar cerca el ecuador.

Si ahora se contrae el anillo, de modo similar a lo que anteriormente indiqué respecto de los anillos de aire que se angostan al moverse del ecuador al polo, el momento angular de ese movimiento ha de ser constante, es decir, su velocidad ha de aumentar en la medida en que disminuya el radio del círculo. Del cálculo resulta que un anillo de radio inicial de 100 millas geográficas, cuyo centro está en 15° de latitud, si se contrajera hasta un radio de 5 millas, adquirirá una velocidad de 278,5 metros por segundo. Esa es la velocidad de una bala de cañón.

El proceso de formación de ciclones se puede simular en cierto sentido bastante bien en agua a una escala más pequeña. Tómese un recipiente circular, como el de la figura adjunta, con una apertura en el fondo, inicialmente tapada con un corcho. Rebullendo con la mano el agua, indúzcase un movimiento rotatorio y sáquese luego el corcho. El agua en el centro empieza a salir, para ser reemplazado por otra masa, la cual fluye desde la periferia y cuya rotación aumenta en la medida en que se acerca al centro. Cerca del centro la fuerza centrífuga de los anillos en vehemente rotación crece tanto, que la presión del agua no es capaz de efectuar una contracción adicional. Entonces se forma en medio de la masa de agua, como lo muestra la figura, un tubo vertical lleno de aire, que se extiende hasta la apertura del fondo, y que se ensancha hacia arriba en forma de embudo, normalmente con paredes estriadas en espiral. Este tubo tiene exactamente aquella forma con la que se suele dibujar las trombas. Si se arroja un corcho, pintado por un lado de negro y por el otro de blanco, en el tubo, gira tan rápido que los dos colores se mezclan en un gris uniforme. Es posible alimentar el vórtice tanto tiempo como se quiera, si se reintegra por arriba el agua desaguada mediante una pequeña bomba, de tal modo que al entrar tangencialmente a lo largo de la pared de la tina se ciña inmediatamente al movimiento vortiginoso. Tal es la función del tubo t indicado en la figura.



Figura

También en esta agua podemos observar la transición de un movimiento lento y vortiginoso a uno extraordinariamente rápido. Tan pronto el vórtice se haya formado, el desagüe es mucho más lento, porque la mayor parte del desagador es ocupada por el aire. Es principalmente el agua del fondo del recipiente la que sale, después de haber perdido su velocidad por fricción con el vidrio. Si se echa arena en el agua, desciende rápidamente en líneas espirales hasta la apertura, donde es expulsada, mientras que pedacitos de oblea, suspendidos en el agua, pueden participar, sin acercarse a la apertura, del movimiento rotatorio durante docenas de minutos. Los ciclones tienen cerca de la superficie el mismo movimiento en espiral hacia el centro. También para éstos estamos autorizados a suponer que es principalmente la poderosa fuerza centrífuga la que retarda el ascenso del aire caliente. Sólo en la medida en que el tremendo movimiento rotacional es mermado cerca de la superficie por fricción, podrá ascender el aire, sin dejar de girar arriba, hasta agrandar sus círculos y disminuir su rotación en la medida en que nuevo aire viene a reemplazarla.

Una vez formado semejante vórtice, dicho sea de paso, puede mantenerse tanto en el aire como en el agua durante mucho tiempo, incluso después de que las causas que lo gestaron dejen de actuar; el movimiento circular de las masas de aire se mantiene en sus trayectorias por inercia propia de toda masa grave. Sólo se desvanece gradualmente bajo la influencia del rozamiento. Sobre las leyes del movimiento de tales vórtices realicé personalmente investigaciones teóricas en el año de 1858, cuyos resultados pudieron ser confirmados experimentalmente en algunos casos más sencillos. Estos resultados también son aplicables a los grandes vórtices atmosféricos. En la zona de los alisios se inclinan los ejes de los vórtices, puesto que su extremo inferior es empujado por los mismos hacia el suroeste, mientras que el superior se recuesta hacia el noreste, bajo la acción de los contralisios. Pero un vórtice inclinado tiene que propagarse en la dirección del aire que fluye a través del ángulo agudo que forma con el suelo, es decir, en la zona de los alisios septentrionales, hacia el noroeste. En el límite de los alisios, el vórtice entra en la región de los vientos predominantemente del suroeste y del oeste e inicialmente los sigue hacia el noreste, para terminar desviándose más hacia el este. Simultáneamente va perdiendo intensidad por fricción con el suelo, tan pronto como

llegue a regiones donde el contraste entre dos capas de aire deja de ser tan regular y pronunciado como en la zona de los alisios.

Más perjudiciales que los ciclones de mar son a menudo los de tierra, pese a su menor envergadura, como los tomados de Norteamérica y nuestros torbellinos y trombas. Pero también nuestras tormentas parecen deber algunos rasgos esenciales de su forma visible a la desestabilización del equilibrio de distintas capas de aire.

Ya había aludido al hecho de que aquí en Europa vivimos en una zona intermedia, donde hay corrientes ecuatoriales y polares que se desplazan alternativamente. Aquéllas acarrearán aire que, aunque haya perdido una parte de su humedad en lluvias tropicales, contiene aún suficiente como para estar dispuesto a producir nuevas precipitaciones después del enfriamiento que sufre en su viaje hasta la zona templada. Su contenido en humedad en un día de verano altamente caluroso se manifiesta por la sensación de bochorno que suscita, en contraste con el aire seco y cálido de los vientos estivales del este. En aire seco y cálido, nuestro cuerpo puede refrescarse mediante la transpiración, en aire húmedo no. En una habitación, calentada hasta poco más de 42 °C, y saturada de vapor, perecen animales de sangre caliente después de cierto tiempo, porque sus cuerpos, al desarrollar constantemente calor interno por metabolismo y sin medios de refrigeración, se calientan hasta más de la temperatura mencionada. Esa calidad bochornosa del aire es la que crea la expectativa de una tormenta.

Durante algún tiempo se estancan las corrientes en puja mutua, y se hace la calma. Pero cuando finalmente la pujante corriente polar logra imponerse en algún lugar, obligando al aire húmedo de la corriente del oeste a elevarse, el cual pierde velozmente su capacidad de resistencia, porque la parte evasiva se dilata y enfría en las regiones superiores, segregando su agua que casi siempre cae a continuación en forma de lluvia. Como en los ciclones, lo elevado se hace por eso relativamente más liviano, y hacia el lugar liberado de una parte de su presión, se lanzan las masas cálidas y húmedas, para a su vez repetir el mismo proceso. Las corrientes ascendentes de aire, que precipitan en altura grandes cantidades de humedad, forman rápidamente las nubes apelotonadas y enarboladas de las tormentas. Comúnmente se intensifican en ese proceso los movimientos laterales, inicialmente débiles, del aire succionado, convirtiéndose en fuertes vientos arremolinados, que preceden directamente tanto a las lluvias como a las posteriores exacerbaciones, pero manifestando una menor rotación y traslación que los grandes ciclones del trópico. La tempestad se disipa, cuando la corriente del este logra desalojar los bochornos ponientes que reinaban antes, pues la tormenta no es otra cosa que el proceso de desplazamiento, y las particularidades que Reye demostró acerca del equilibrio entre el aire seco y el húmedo causan también en este caso el que el desplazamiento, apenas se dé comienzo al mismo, tenga lugar en toda su extensión.

En lo que atañe a las descargas eléctricas, su fuente es probablemente un depósito de electricidad negativa, con la que constantemente está cargada la tierra. Los gases, incluso el vapor puro, no neblinoso, aíslan y no pueden intercambiar directamente electricidad con la tierra. Aun cuando la superficie del agua, cargada de electricidad negativa, desprenda vapores, éstos no llevan consigo la electricidad que tenían cuando eran agua¹³. Sólo cuando las masas de agua en la nube, que se reúnen para conformar la lluvia, se acercan mutuamente tanto que pueden saltar chispas de gota en gota, formándose así un conductor enorme, hacia el cual pueden saltar poderosas chispas, los rayos, incluso desde el suelo. Los rayos son de ordinario la señal de una vehemente

precipitación que se produce en ese instante; pero la masa de lluvia, de la cual se descargan, necesita más tiempo para llegar a tierra que el rayo eléctrico. Por eso, apenas unos segundos después de caer el rayo, notamos la lluvia intensificada que lo había provocado. La sucesión temporal de nuestra percepción de esas modificaciones es exactamente opuesta a la sucesión de causa y efecto. Primero cae el rayo y luego se intensifica la lluvia; y después del transcurso de la lluvia, cambia el viento. Pero la primera causa es el más aplomado viento del este, que avanzando puja: causa la precipitación, y ésta da origen al rayo.

No es del todo inverosímil que un incendio o el estrépito de los cañones en una batalla, como se ha afirmado, haya atraído una tormenta. Basta que el estado correspondiente a un equilibrio inestable en la atmósfera haya sido preparado, para que cualquier circunstancia que logre hacer ascender una pequeña parte de aire húmedo y cálido, haga las veces de la chispa en un barril de pólvora y guíe la descarga principal hacia el lugar de esa perturbación.

En todo lo descrito no hay nada que no resida simple y llanamente en las acciones regulares de fuerzas físicas bien conocidas; pero el equilibrio indiferente desempeña aquí un papel especial, porque en el caso que se dé, las más insignificantes causas, como ínfimas variaciones de la temperatura, humedad, o velocidad de masas individuales pueden ser responsables de que en uno u otro momento fuerzas colosales se desaten en una u otra dirección. Para poder calcular de antemano, en qué instante y en qué lugar se romperá el equilibrio indiferente, tendríamos que conocer, para empezar, el estado anterior de la atmósfera, con mucho más detalle de lo que se puede en la actualidad. Pues no conocemos sino promedios de temperatura, humedad y vientos en la superficie de la Tierra, con los valores exactos tan sólo para sendas estaciones meteorológicas y horas de observación. En segundo lugar, una vez que tengamos los datos exactos, tendríamos que estar en capacidad de efectuar el cálculo del transcurso subsiguiente con la precisión correspondiente. Pero pese a que podemos indicar las reglas generales de cómo hacer semejante cálculo, su verdadera realización sería un trabajo tan inmenso, que por ahora hemos de prescindir de él, hasta que se hallen nuevos métodos.

E incluso creo que es preciso observar que sólo es posible calcular con anticipación aquellos procesos en la naturaleza, al igual que comprenderlos en todos sus pormenores, cuando al comenzar el cómputo, pequeños errores produzcan también errores pequeños en el resultado final. Tan pronto interviene un equilibrio indiferente, deja de cumplirse esta condición. (Énfasis del traductor).

Así es que en nuestro horizonte científico persiste el azar; pero en realidad es sólo la expresión de lo defectuoso que es nuestro conocimiento y de la torpeza de nuestra capacidad de combinación. Una mente que tuviera un conocimiento exacto de los hechos, y cuyas operaciones mentales fueran suficientemente rápidas y precisas, para adelantarse a los sucesos, no dejaría de ver en los más desenfrenados caprichos del tiempo, no menos que en el curso de los astros, el operar armónico de leyes eternas, que nosotros sólo podemos dar por sabido y sospechar.

¹ En la versión escrita de la conferencia, Helmholtz añade que el versículo es de Goethe.

² Esto lo escribió Helmholtz antes de haberse establecido el sistema telegráfico de informes.

³ Significa algo así como «aquí falla algo», o «algo está trabado».

⁴ En Hamburgo, donde pronunció la conferencia Helmholtz, ciudad alemana ubicada a unos 53° de latitud.

⁵ Porque se les podía entregar el timón.

⁶ Pasaje oscuro en el original.

⁷ El prusiano W. H. Dove (1803-1871) fue uno de los meteorólogos más influyentes del siglo XIX. El «padre de la meteorología decimonónica» establece la «ley de las tempestades», con un movimiento ciclónico alrededor del centro de una baja. Con Humboldt introdujo el método estadístico en meteorología, aunque Dove nunca indagó el sentido estadístico de la representación de anomalías espaciales o temporales. Las contribuciones de Dove residen en dicha ley y en su introducción del concepto de dos corrientes, la polar y la ecuatorial. Empleó sólo el método local, examinando el comportamiento cronológico del paso de una borrasca en un lugar determinado. Su conclusión, conocida como «ley del giro» o «ley de las tempestades» es de 1826: «Mientras el barómetro describe una onda, el viento giró alrededor de toda la rosa de vientos, de Sur a Oeste y Norte y luego Este». La causa invocada por Dove: el desalojamiento mutuo de las dos corrientes, la ecuatorial y la polar, ambas sometidas a la acción desviadora del movimiento de rotación terrestre. El nacimiento de ciclones lo atribuía al combate entre estas corrientes. Dove se apuntalaba en el método estadístico corriente en su tiempo, estudiando las "rosas de viento" de los distintos elementos. Examinó atentamente las distintas masas de aire y sus orígenes, prefigurando ideas modernas.

⁸ Uno de los primeros en investigar varios ciclones tropicales fue William Redfield (1789-1857), en 1831, en cuanto a dirección y estructura. En 1839 realiza investigaciones parecidas el británico W. Reid, gobernador de Bermuda y Barbados.

⁹ Para la investigación de las tempestades sirvieron de base las observaciones de la presión atmosférica y de los vientos. La meteorología práctica aprovechó las experiencias de los navegantes. Poco a poco se reconoce que los torbellinos atmosféricos, la estructura "cilíndrica" de los tomados, las mangas, los ciclones, los huracanes y tifones tienen un eje vertical. El capitán Henry Piddington (1798-1862), de Calcuta, acuñó la palabra ciclón.

¹⁰ En mi opinión, Th. Reye fue un matemático alemán, no un ingeniero francés ni meteorólogo suizo, como se puede leer en la literatura norteamericana, incluso la escrita por historiadores. Fue el primero en presentar una deducción rigurosa del gradiente pseudoadiabático de temperatura en la atmósfera.

¹¹ Clausius (1822-1888), gran físico alemán del siglo XIX. Sus aportes a la termodinámica clásica son los más recordados. Introdujo el concepto de energía interna en 1850 y, en 1865, acuñó la palabra entropía.

¹² Pasaje oscuro para mí. El aire húmedo es más liviano que la misma masa de aire seco a la misma temperatura.

¹³ Nota de Helmholtz: Este pasaje fue alterado para tener en cuenta los experimentos que en el laboratorio de Berlín realizó el Sr. Blake y la explicación que de ellos dio el Sr. Werner Siemens.