

diego manuel ruiz

# ciencia en el aire

presión, calentamiento, lluvias,  
vientos, rayos ¡y centellas!  
en la atmósfera terrestre



**XXI** siglo veintiuno  
editores

colección  
ciencia que ladra...

## 2. Atmósfera, sin ti me falta el aire

### Sube, sube, sube y baja

A fines del siglo XIX, Léon-Philippe Teisserenc de Bort –que, por si al lector le quedaba alguna duda, en efecto, era francés– realizó una serie de ascensos experimentales en globo. Esperaba confirmar un hecho que, en principio, no parecía demasiado lógico: que la cercanía con el Sol no implica un aumento de la temperatura sino, más bien, todo lo contrario. Desde los primeros viajes en globo, unos cien años antes, se venía registrando que, cuanto mayor era la altura, más frío hacía.

La experiencia de De Bort, realizada con los mejores instrumentos de medición de la época, lo confirmó: la temperatura descendía 6 grados centígrados por cada kilómetro que se subía. Pero también observó que, a una altura cercana a los 10 kilómetros, la temperatura dejaba de bajar. De golpe, se estabilizaba a 57 grados bajo cero y después... ¡comenzaba a aumentar! Otro hecho igual de interesante es que, a partir de esa altura, el aire permanece estático, es decir, que prácticamente no se perciben vientos ni corrientes de aire.<sup>16</sup>

Tras repetir la experiencia en distintos lugares del mundo, De Bort estableció un límite para la atmósfera y la dividió en dos capas: debido a la quietud del aire, llamó estratosfera a la capa

16 Asimov, I., *Introducción a la ciencia*, vol. 1, Madrid, Orbis, 1986, p. 157.

superior (que comienza a unos 10 kilómetros de altura) y troposfera (que significa “esfera de movimiento”) a la inferior.

Como los avances en la ciencia de la meteorología y de la aeronáutica siguieron arrojando sorpresas, en la actualidad ya no se divide la atmósfera en una o dos “esferas de aire” (eso quiere decir la palabra “atmósfera”), sino en cinco, cada una de las cuales posee características distintivas.

## Vientos de cambio

La troposfera es la parte de la atmósfera que está en contacto con el suelo. Es la más movедiza y experimenta cambios constantes que, finalmente, son los que determinan el tiempo en cada lugar y en cada momento. Vientos, nubes, tornados, tormentas y muchos otros fenómenos meteorológicos dependen casi exclusivamente de esa capa. Y por cierto es la capa que mejor conocemos, seamos científicos o no, por el simple hecho de vivir en ella.

La troposfera se extiende hasta una altura de entre 10 y 12 kilómetros, salvo en el Ecuador, donde llega a los 17. Pese a que es sólo una de las cinco capas de la atmósfera, gracias a la fuerza de gravedad contiene el 80% de su materia (sí, la fuerza de gravedad también actúa sobre los gases).

En ella encontramos el aire que respiramos, compuesto por 78,03% de nitrógeno, 20,99% de oxígeno, 0,94% de argón, 0,03% de dióxido de carbono, 0,00123% de neón, 0,01% de hidrógeno, 0,0004% de helio, 0,00005% de kriptón, 0,000006% de xenón, 0,00001% de monóxido de carbono, 0,0002% de metano, 0,00005% de óxido nítrico, 0,000002% de dióxido de nitrógeno y 0,000001% de yodo. A esto deben sumarse las partículas de polvo, el ozono y el vapor de agua, presentes en cantidades variables en las diferentes capas. Por ejemplo, el ozono predomina en la estratosfera (con un contundente 0,000007%) mientras que el agua puede variar entre el 1 y el 4% en la troposfera y

bajar a cerca de 0,40% en las capas más elevadas. Ciertas áreas presentan, además, otros componentes cuyo origen no es natural y que suelen considerarse contaminantes atmosféricos, de los que hablaremos en otro capítulo.

Durante la Segunda Guerra Mundial, los aviones bombarderos que lograban elevarse casi hasta los límites de la troposfera descubrieron que allí había vientos fuertes y constantes con una velocidad promedio de 300 kilómetros por hora, aunque en ocasiones pueden llegar a duplicar esos valores. Esas corrientes de aire, denominadas corrientes en chorro o *jet streams*, se ubican entre los 9 kilómetros de altitud y el límite con la estratosfera, y poseen miles de kilómetros de extensión (imagen 1). Algunas aeronaves suelen aprovecharlas para desplazarse a lo largo del planeta reduciendo su consumo de energía. Estas corrientes existen en el hemisferio norte, en la latitud promedio de los Estados Unidos y el norte de China, y en el hemisferio sur, en la de Argentina y Nueva Zelanda. Dado que suelen ejercer influencia sobre las masas de aire inferiores resultan de gran importancia para la predicción meteorológica, ya que estas corrientes participan en la formación de las superceldas, que son los sistemas tormentosos que generan tornados. Un ejemplo típico de su incidencia es el tan mentado viento norte, que afecta algunos países del sur de Sudamérica como Paraguay, Uruguay y la Argentina.

Al llegar al final de la troposfera los vientos desaparecen de manera abrupta y la temperatura permanece constante a 57 grados centígrados bajo cero, lo que marca un límite con la capa siguiente, denominada tropopausa. Su efecto sobre el aire que se encuentra debajo afecta las nubes de tormenta altas, que suelen achatarearse en su cúspide y adoptan una forma de yunque al entrar en contacto con la frontera entre capas.



**Imagen 1:** Vista de las corrientes en chorro arrastrando un sistema nuboso.

## Pantalla solar

La capa que sigue a la troposfera es la estratosfera, que contiene cerca del 19% del aire total del planeta. Allí se percibe una calma tal que sorprendería a los que vivimos en la superficie. Otra particularidad de esta capa es que, a diferencia de lo que ocurre en la troposfera, allí la temperatura del aire comienza a aumentar paulatinamente a medida que se asciende.

Entre los 15 y los 40 kilómetros de altitud aparece en el aire un componente poco habitual en el resto de la atmósfera, el ozono. Como mencionamos más arriba, la famosa capa de ozono estratosférico que nos protege de la luz ultravioleta del Sol es de sólo 0,000007% en el aire. Ese porcentaje ínfimo alcanza para evitar

que casi el 99% de la radiación más dañina del Sol llegue a la superficie. Otra curiosidad del ozono es que se trata de un gas muy reactivo y bastante tóxico para los seres vivos, por lo que debemos estar agradecidos de que se encuentre a más de 15 kilómetros de altura: si estuviera al nivel de la superficie, la vida tal como la conocemos no existiría.

En realidad, es probable que quien espere encontrar literalmente una capa en la estratosfera se sienta bastante defraudado; se trata de hecho de una franja que abarca unos 25 kilómetros de espesor, que contiene un gas que, si bien en estado puro, tiene un tono azulado, y que al estar tan diluido en el resto de los gases del aire pasa bastante inadvertido.

Como señalamos en el capítulo anterior, el ozono tiene su origen en el propio oxígeno del aire. Químicamente, el oxígeno que respiramos consiste en moléculas formadas por dos átomos de oxígeno unidos mediante electrones compartidos entre sí con una determinada energía. Cuando la luz ultravioleta incide en la estratosfera, les aporta a las moléculas de oxígeno la energía suficiente como para romper la unión y liberar dos átomos de oxígeno. Este tipo de átomos es muy reactivo: en buen criollo, reacciona con lo que tiene más a mano (si se me permite la licencia poética de atribuir a un simple átomo extremidades con dedos), que suele ser alguna molécula de oxígeno vecina a la que se acopla para formar una molécula diferente, cuyos tres átomos de oxígeno conforman los vértices del triangulito molecular que es la molécula de ozono.

Ese mismo mecanismo, tomado a la inversa, explica por qué el ozono absorbe luz ultravioleta: las moléculas de ozono toman esa radiación para volver a separarse en una molécula de oxígeno y un átomo de oxígeno libre, que formará una nueva molécula de ozono, mientras que la energía residual de la transformación se libera en forma de calor (que es la causa principal del aumento de la temperatura en la estratosfera). Como ya vimos, la radiación ultravioleta es la luz con mayor energía que nuestro planeta recibe del Sol, pero, para estudiarla, se la suele dividir en tres tipos de diferente magnitud energética: la radiación UV-A (la menos

dañina de todas), la radiación UV-B y la radiación UV-C (la más perjudicial y de mayor energía). La unión entre los átomos de las moléculas de ozono genera una energía similar a la de la radiación UV-C y una parte importante de la radiación UV-B. Esas formas de radiación no llegan a la superficie porque las moléculas de ozono las aprovechan para romperse, y es por eso que la capa de ozono nos protege de gran parte de la radiación UV.

La absorción de radiación también provoca que, en la estratosfera, la temperatura del aire aumente de manera paulatina, hasta aproximarse a unos 4 grados centígrados bajo cero a 50 kilómetros de altura, donde la temperatura vuelve a estabilizarse y marca un nuevo límite, la estratopausa.

### **La del medio siempre es la más tranquila**

Quien alguna vez haya tenido la suerte de ver una estrella fugaz habrá visto, en ese instante hermoso y repentino, un haz de luz que cae por el cielo hasta desaparecer. Quizá se trate de una de las pocas evidencias visibles, desde aquí abajo, de la existencia de la tercera capa atmosférica: la mesosfera.

Esta capa, cuyo nombre significa “esfera central”, comienza después de la estratopausa y suele ser la menos llamativa de todas (tiene tan bajo perfil que durante años los científicos, en broma, la llamaron “ignorosfera”).

La mesosfera contiene un 0,1% del total del aire, lo que implica que las moléculas están muy separadas entre sí. Sin embargo, tiene aire suficiente como para protegernos del acoso de la mayoría de las rocas pequeñas con las que nuestro planeta se cruza en el espacio: cuando se acerca un meteorito, el roce con esas partículas genera calor suficiente como para incinerar cualquier roca de tamaño medio, lo que da origen a la luz que observamos desde la Tierra y, poéticamente, llamamos estrella fugaz.

La mesosfera es también la más fría de todas las capas, pues allí no hay gases, como el ozono, capaces de generar calor a partir de

la luz solar ultravioleta. Es por eso que, a medida que se asciende, las temperaturas caen: comienza, como acabamos de decir, a 50 kilómetros de altitud con unos 4 grados centígrados bajo cero hasta llegar, en el límite superior de 80 kilómetros, a unos 90 grados bajo cero, la temperatura más baja de la atmósfera.

Debido a esas bajísimas temperaturas, presenta (al igual que la troposfera y, en menor medida, la estratosfera) un tipo muy particular de nubes, las nubes noctilucientes o nubes mesosféricas polares, que se llaman así porque sólo pueden verse durante el crepúsculo en latitudes cercanas a los polos (si tienen un mapamundi cerca, esto sería un poco antes de los círculos polares). Como se encuentran muchísimo más alto que cualquier otra nube, a casi 80 kilómetros de la superficie terrestre, están formadas por cristales de hielo y sólo son visibles cuando las otras dos capas están ocultas por la sombra del planeta y las últimas luces del Sol se reflejan en esos cristales (de ahí que sean luminosas) (imagen 2).



**Imagen 2:** Nubes noctilucientes sobre el parque nacional Soomaa, Estonia.

El 1° de febrero de 2003 el transbordador espacial Columbia sufrió ese efecto de roce con las moléculas de la mesosfera: al romperse un fragmento del aislante térmico, se incineró y, en un instante, se esfumaron la estructura del transbordador y las vidas de sus siete tripulantes.

### **¡Qué calor!: 1500 grados es fiebre**

Así como la mesosfera es la capa mas fría, la que le sigue es la más caliente, lo suficiente como para que los científicos la denominaran termosfera, que significa “esfera de calor”. Y al igual que en la estratosfera, su capacidad de generar ese calor se debe a cierto efecto. La diferencia es que, en este caso, se trata de muchísimo calor, el suficiente como para que la temperatura, a medida que se asciende, llegue a los 1500 grados centígrados.

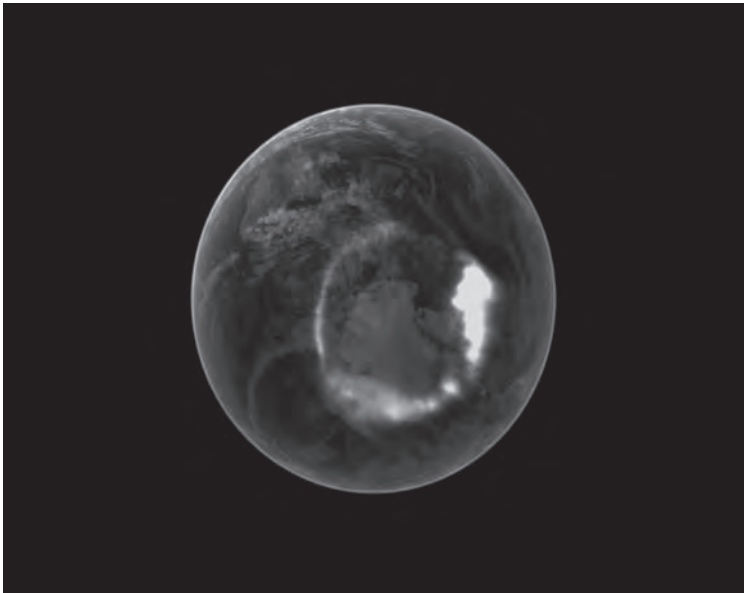
A partir de los 80 kilómetros de altitud esta capa de aire es la que recibe los rayos gamma y los rayos X provenientes del Sol, una radiación con tanta energía que es capaz de arrancarle algunas partículas a los átomos presentes y generar átomos eléctricamente cargados, los iones, razón por la cual también se la denomina ionosfera. La inmensa cantidad de calor puesta en juego en ese proceso es la responsable de ese inusitado aumento de temperatura.

La temperatura que alcanza la termosfera depende de la energía que recibe del Sol. Por ende, varía según los ciclos que afectan la actividad solar cada once años: durante las épocas en las que su actividad es mínima, alcanza valores cercanos a los 500 grados centígrados, mientras que cuando su actividad es máxima, puede llegar hasta los 1500. Por la misma razón la termosfera tiene una amplitud térmica entre el día y la noche que puede llegar a una diferencia de 500 grados centígrados.

Como toda capa de la atmósfera que se precie de tal, la termosfera también tiene sus asuntos propios: así como la troposfera cuenta con el clima, la estratosfera con la capa de ozono y la mesosfera con las estrellas fugaces, en la termosfera se gene-

ra uno de los fenómenos atmosféricos más bellos, las auroras polares.

Dado que poseen carga eléctrica, el campo magnético terrestre conduce los iones hacia los polos, en donde interactúan con las otras moléculas entregándoles energía que más tarde se elimina en forma de luz. A esa luminiscencia se la llama aurora y, en época invernal, aunque no exclusivamente, suele observarse en el polo norte (auroras boreales) y en el polo sur (auroras australes; véase la imagen 3). Una curiosidad es que, en un “intento” por estudiar el comportamiento de las capas superiores de la atmósfera, se ha logrado crear auroras artificiales con relativo éxito.



**Imagen 3:** Aurora austral captada desde el satélite IMAGE en 2005.

En la década de 1950, mientras se realizaba una serie de ensayos nucleares a gran altura para analizar si las bombas nucleares podían generar un pulso de electrones que silenciara las telecomu-

nicaciones, se descubrió otro efecto: que una explosión nuclear por encima de los 30 kilómetros provoca un flujo de electrones que facilita la producción de una gran cantidad de iones y estos, al entrar en contacto con las moléculas de la atmósfera, crean una aurora instantánea. Debido a esto, las bombas atómicas detonadas con estos fines fueron bautizadas con el sarcástico nombre de bombas arcoíris.

Un par de décadas más tarde, esta vez con fines más científicos, se llevó a cabo un proyecto de estudio de la alta atmósfera en Alaska. Por medio de cohetes se dispersaba bario, un elemento que creaba una nube de unos 10 kilómetros de diámetro que, en las condiciones de energía imperantes en la termosfera, se ionizaba rápidamente y generaba una aurora. Al avanzar, ese proyecto fue modificando los ensayos y reemplazando el método químico por otro más eficaz en el que los cohetes desplegaban un haz de electrones sobre el campo magnético terrestre, lo que producía iones más eficientes y auroras más intensas y más luminosas.<sup>17</sup>

Por otro lado, la presencia de iones y electrones libres en la termosfera también posibilita la comunicación mediante ondas de radio desde un punto a otro del planeta, puesto que esas ondas se reflejan en la termosfera, que las reenvía hacia la superficie produciendo un cierto ángulo (debido a la curvatura del planeta y, por ende, de cada una de las capas atmosféricas), lo que permite la intercomunicación entre las estaciones terrestres.

Pero la historia con la termosfera no se termina ahí, pues en los últimos años se ha descubierto que presenta otra característica muy interesante: los días previos a un terremoto cambia su comportamiento. Este hecho, que en el futuro podría aprovecharse como señal de alerta, se relaciona, según algunas teorías, con que las rocas, al estar sometidas a las tremendas presiones que ocurren

17 O'Neil, R. R. y otros, "Excede 2 Test, an Artificial Auroral Experiment: Ground-based Optical Measurements", *Journal of Geophysical Research*, vol. 83, 1978, pp. 3281-3288.

en los movimientos tectónicos que originan un terremoto, actúan como conductores eléctricos.<sup>18</sup> Es decir, esa impresionante cantidad de energía crea corrientes eléctricas ascendentes que, al llegar a la superficie, ionizan el aire. Ese aire, a su vez, comienza a remontan la atmósfera hasta la termosfera. Allí produce perturbaciones, perceptibles mediante satélites con los detectores adecuados, y, a veces, luces similares a las de las auroras, las llamadas luces de terremoto, cuyo origen, por mucho tiempo, había sido inexplicable.

La termosfera, que es la zona en la que suelen orbitar los transbordadores espaciales, se extiende hasta los 600 kilómetros de altura; a pesar de que posee apenas el 0,001% del aire de toda la atmósfera, se la sigue considerando como aire.

### **El espacio... la frontera final**

A una altitud cercana a los 600 kilómetros, la temperatura deja de subir y se vuelve constante. Ahí comienza el límite entre nuestro planeta y el espacio exterior, la exosfera (o “esfera exterior”), y es donde la mayoría de los satélites artificiales están en órbita con nuestro planeta.

En esa zona, los gases comienzan a dispersarse de modo gradual hasta alcanzar la composición prácticamente nula que corresponde al espacio exterior. Como esa disminución es progresiva, el punto que marca el límite entre la atmósfera y el espacio no es preciso, pero se estima que ocurre a una altitud de 10 000 kilómetros. Eso ubica la exosfera, junto a la parte superior de la termosfera, dentro de la magnetosfera (que se extiende desde los 500 hasta los 60 000 kilómetros), por lo que recibe parte de las partículas del viento solar.

18 Freund, F. T., “Rocks that Crackle and Sparkle and Glow: Strange Pre-earthquake Phenomena”, *Journal of Scientific Exploration*, vol. 17, 2003, pp. 37-71.

## Un peso sobre los hombros

Ya hemos dicho que el 80% del aire se encuentra en la troposfera, el 19% en la parte baja de la estratosfera y el 1% restante en las demás capas. Estos porcentajes dan cuenta de dos fenómenos físicos importantes: la atracción gravitatoria y la compresibilidad de los gases.

La fuerza de gravedad atrae los gases de la atmósfera y la dirección de esa fuerza los “empuja” hacia abajo, comprimiéndolos contra el suelo. Esto causa que, en la superficie, haya muchas más moléculas de los gases que componen el aire de las que hay a mayor altitud, donde el aire está menos comprimido.

A nuestro nivel, la distancia promedio entre moléculas es mínima, cerca de una octomillonésima de centímetro, mientras que donde empieza la termosfera, como hay una proporción mínima de aire, la distancia promedio entre dos moléculas puede alcanzar algunos kilómetros (los que están cansados de los transportes públicos urbanos o de los monoambientes mínimos ya saben dónde mudarse).

La atracción de todos esos gases hacia el centro de la Tierra tiene también otra consecuencia relevante: esa masa de aire comprimido ejerce la fuerza de todo su peso sobre la superficie y, por lo tanto, sobre nosotros. Para entender esta idea, imaginemos que la atmósfera es como un océano de aire y que nosotros somos cangrejos o cualquier otro ser habituado a desplazarse por el fondo marino.

El aire que hay por encima de nosotros tiene un peso estimado de... ¡20 toneladas!, que soportamos desde que somos bebés porque los humanos, al igual que los restantes seres que habitan la superficie terrestre, estamos preparados para hacerlo (si algún lector todavía no se hizo una idea cabal de lo que está leyendo, lo invitamos a levantar con sus propios brazos tres elefantes de tamaño promedio. ¿Listo, lo consiguió? Al menos en materia de aire, eso es lo que soportamos a diario sobre nuestros hombros). La presión no es otra cosa que la fuerza que ejerce ese peso de aire al actuar sobre una superficie.

Este hecho fue descubierto y medido en 1644 por Evangelista Torricelli y por su asistente, Vincenzo Viviani,<sup>19</sup> quienes observaron cómo la altura de un tubo de vidrio invertido, relleno con mercurio y cerrado en un extremo, variaba al entrar en contacto con un recipiente que estaba al aire. Torricelli había notado que el mercurio de la columna dentro del tubo caía en el recipiente, pero sin vaciarse del todo; siempre quedaba algo, y cuantas veces repitieron la experiencia ese poco que no salía siempre estaba a la misma altura: a 76 centímetros por encima del nivel de líquido del recipiente.

Viviani postuló que este fenómeno se debía a que el aire imprimía su propio peso sobre el líquido del recipiente, y por eso el mercurio dejaba de descargarse, es decir, que el peso del aire era equivalente a la fuerza que le oponía esa columna de 76 centímetros de mercurio. También probaron que la experiencia podía realizarse con cualquier líquido, no sólo con mercurio, pero que, en casi todos los casos, la altura era mayor. Por ejemplo, el agua alcanzaba unos 10 metros. Esta resultó una experiencia de trascendencia histórica ya que fue la primera vez que se postuló la idea de que el aire tenía peso y, simultáneamente, se inventó un instrumento para medir su presión: el barómetro.

Otro al que le gustaban las columnas de mercurio era el francés Blaise Pascal, quien en 1648 mandó a su cuñado, Florin Périer, a la punta del volcán Puy de Dôme (de 1400 metros) munido de un barómetro, para que midiera la posición del mercurio mientras iba subiendo.<sup>20</sup> Pese a que pueda parecer un burdo intento de sacárselo de encima, el experimento le permitió a Pascal notar que la altura de la columna descendía a medida que su cuñado se acercaba a la cima. Eso significaba que a mayor altura corresponde menor presión, algo que le pareció bastante lógico, pues a mayor altura hay menos aire.

19 Asimov, I., ob. cit., p. 154.

20 *Ibid.*, p. 155.

## Sin ti me falta el aire...

En condiciones de altura extrema, donde el aire es escaso –y, en consecuencia, lo es también la cantidad de oxígeno– y la presión es baja, la vida no es muy viable para los seres humanos. El límite de tolerancia para la vida humana es de unos 5500 metros.<sup>21</sup>

Quienes habitan en regiones muy altas, como los tibetanos o los nepaleses, suelen tener pulmones más grandes para poder hacer ingresar más aire al inspirar, y su sangre posee la capacidad de transportar más oxígeno. En cambio, los que no poseemos ese desarrollo, cuando estamos a gran altura sufrimos la menor cantidad de oxígeno, que provoca el aumento de nuestra frecuencia respiratoria (hiperventilación). Este esfuerzo produce un agotamiento físico general y un aumento de la presión arterial, a lo que suele sumarse un constante dolor de cabeza (que sin duda es inducido por ese malestar). A esa serie de afecciones se la conoce como mal de montaña, que por aquí recibe el nombre de apunamiento.

## Cumbres borrascosas

Además de esos malestares, la menor presión atmosférica genera cambios en otros comportamientos físicos, por ejemplo, hace que baje el punto de ebullición de los líquidos. ¿Por qué? Porque, al haber menor presión externa (de la atmósfera), las moléculas de los líquidos pasan más fácilmente al estado gaseoso, por lo que se necesita menos energía para que ese cambio se produzca en todo el volumen del líquido (es decir, para que entre en ebullición), en comparación con la que se requiere en lugares más bajos.

Por ejemplo, en la ciudad de Salta, ubicada a 1200 metros sobre el nivel del mar, el agua hierve a casi 96 grados centígrados, en

21 Ashcroft, F. M., *Life at the Extremes: The Science of Survival*, Berkeley, University of California Press, 2002, p. 8.

lugar de los 100 a los que hierve en lugares que están a nivel del mar, mientras que a 7000 metros el punto de ebullición es de sólo 77 grados (¡sería un despropósito subir al Aconcagua y notar que el mate está frío!). Otro efecto que produce la altura es la reducción de la resistencia del aire. Al haber menor cantidad de aire, cualquier objeto lanzado sufre una menor resistencia por parte de la atmósfera, por lo que puede llegar a mayor distancia que la que alcanzaría al ser arrojado al nivel del mar. También es menos probable que el empuje del aire desvíe algunos objetos. Uno de los ejemplos más conocidos es el famoso “la pelota no dobla” de Pasarella, que mencionamos al principio del libro. Al margen de la cuestión futbolística, es cierto que, en la altura de Quito, unos 2800 metros sobre el nivel del mar, una pelota puede desplazarse unos 30 metros más de lo usual, y también es verdad que los efectos que se le pueden imprimir al tiro (como las “combas”), que justamente se valen de la resistencia del aire para ser efectivos, no responden del mismo modo.<sup>22</sup> (Pero no hay que exagerar porque, de lo contrario, podríamos culpar a la fuerza de gravedad por la derrota o incluso acusar al mismísimo Isaac Newton de ser hinchado de Ecuador...)

### **Todo lo que sube, ¿tiene que bajar?**

Como vimos, la gravedad tiene sus reglas: si se tira algo hacia arriba, la fuerza del lanzamiento logra vencer la de gravedad (obviamente, siempre y cuando sea mayor), por lo que el objeto sube, pero a medida que asciende comienza a desacelerarse, pues la fuerza que lo impulsó ha desaparecido y la única que sigue actuando es la de gravedad, que lo atrae hacia abajo. Es por eso que, en cierto punto, cuando logra su altura máxima,

22 Este tema se trata exhaustivamente en el libro *El deportista científico*, de Martín de Ambrosio, de esta misma colección.

alcanza una velocidad cero y luego comienza a caer. ¡Un nuevo triunfo de la gravedad, amigos!

Pero otra de las características de la ley de atracción gravitatoria es que esa fuerza disminuye en gran medida con la distancia. Esto significa que cuanto más alto se lance el objeto, menor será la fuerza ejercida por la gravedad sobre este en el punto más elevado. Si avanzamos más en esta idea, podríamos pensar que debe haber una velocidad de lanzamiento capaz de enviar el objeto tan alto que la gravedad sea demasiado débil como para traerlo de vuelta. Esa velocidad se denomina velocidad de escape y, en el caso de nuestro planeta, es de 11,23 kilómetros por segundo.

En otras palabras, cualquier objeto que supere esa velocidad no caerá, por lo que podrá escapar de nuestro mundo. Y, por supuesto, dentro de esos objetos variopintos también están incluidos los gases del aire. En las elevadas termosfera y exosfera, la energía recibida por las moléculas del aire puede llegar a impulsarlas lo suficiente como para que abandonen nuestro planeta. Pero la capacidad de superar la atmósfera depende del peso de las moléculas que componen el objeto; por ejemplo, una molécula de hidrógeno es dieciséis veces más liviana que una de oxígeno y, por ende, tiene una mayor probabilidad de lograr velocidades superiores a la de escape. Esto permite entender por qué, con el correr del tiempo, sólo los planetas más grandes y con mucha más masa lograron retener los gases más livianos en su atmósfera: Júpiter, el planeta más grande de nuestro sistema solar, posee una velocidad de escape de 61 kilómetros por segundo y, como ya dijimos, su atmósfera está formada en un 90% por hidrógeno.

### ***Volare, oh oh!***

Desde la leyenda mitológica de Ícaro, pasando por los bocetos de máquinas voladoras de Leonardo da Vinci, el sueño de volar del hombre nunca desapareció. Por el contrario, continúa iluminando las mentes de las personas que sueñan con dominar los aires.

Antes del surgimiento de los primeros artefactos aéreos, lo más alto que los hombres podían elevarse en la atmósfera era escalando los picos de mayor altitud del planeta. Quizás el más frecuentado para los estudios científicos haya sido el Mont Blanc, no tanto por su altura, superior a los 4800 metros, como por su cercanía con las grandes urbes europeas. Recién en 1709 el brasileño Bartolomeu Lourenço de Gusmão puso a prueba un invento que venía desarrollando hacía años y logró elevarse en el aire unos pocos metros;<sup>23</sup> Gusmão llamó a su artilugio “instrumento para andar por el aire”. Más tarde, un artefacto similar, el globo aerostático, fue desarrollado (sin conocer el logro del brasileño) con mucho más marketing por los hermanos Joseph-Michel y Jacques-Étienne Montgolfier, que se hicieron famosos gracias a sus globos inflados con aire caliente, lo que les permitía ascender, pues el aire caliente es más liviano que el frío. El invento fue perfeccionado cuando se comenzó a usar hidrógeno, mucho más liviano aún. Los Montgolfier hicieron algunas pruebas no tripuladas en 1782, que fueron superándose una tras otra hasta alcanzar alturas estimadas en 2000 metros.<sup>24</sup>

Si hoy en día muchas personas consideran que volar es peligroso, ¡imagínense lo que sería hacerlo en ese entonces! Después de todo, aunque no se conocía la sensación de elevarse por los aires, sí se tenía perfecta conciencia de los efectos de una caída desde mucha altura. El paso siguiente fue hacer viajar seres vivos en los globos, y los elegidos, como anticipamos en la introducción, fueron un pato, una oveja y un pollo que el 15 de octubre de 1783 se elevaron sobre el palacio de Versalles en una demostración ante el rey.<sup>25</sup>

23 Visoni, R. M. y García Canalle, J. B., “Bartolomeu Lourenço de Gusmão: o primeiro cientista brasileiro”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 31, 2009, pp. 3604-3612.

24 Rumerman, J., “Early Balloon Flight in Europe”, sitio ruso de equipos de globo, disponible en <elballoons.ru> [visitado en enero de 2012].

25 Asimov, I., ob. cit, pp 157.

En lo que a humanos se refiere, los primeros en desplazarse en globo fueron Jean-François Pilâtre de Rozier, un profesor de física y química, y el marqués François Laurent de Arlandes, quienes hicieron un recorrido de 13 kilómetros a poco más de 900 metros de altura en lo que fue el primer vuelo humano de la historia.<sup>26</sup> Además de un pionero en el arte de volar, De Rozier también ostenta otra marca menos feliz en la historia de la aeronáutica: la de ser la primera víctima fatal de un accidente aéreo, cuando intentaba cruzar en globo el canal de la Mancha en 1785. Casual e irónicamente, ese mismo año su coterráneo Jean-Pierre Blanchard inventó el paracaídas.

También ese fue el año en que Gastón Tissandier, Joseph Croce-Spinelli y Théodore Sivel batieron el récord de altura al alcanzar los 8600 metros. Sin embargo, su aventura no tuvo un buen desenlace: la falta de oxígeno hizo que, cuando estaban cerca de los 8000 metros, los tres se desvanecieran, y el único que logró bajar con vida fue Tissandier.<sup>27</sup>

En 1804, en pleno auge del globo aerostático, el científico francés Joseph-Louis Gay-Lussac logró elevarse casi hasta los 7000 metros y recolectar muestras de la atmósfera. Hacia fines del siglo XIX comenzaron a utilizarse globos sin tripulantes humanos equipados con instrumentos de medición, lo que permitió varios avances en el estudio de las condiciones atmosféricas.

## **Donde ni las águilas se atreven**

La posibilidad de ascender cada vez más y el posterior desarrollo de los aviones mostraron que el dominio de las alturas no era exclusivo de los seres humanos. Muchos insectos alcanzan alturas al parecer increíbles, como los mil metros a los que puede llegar una

<sup>26</sup> Rumerman, J., ob. cit.

<sup>27</sup> Ibíd.

mariposa, e incluso la mosca doméstica (que en verano vive sobrevolando nuestro living-comedor) tiene la capacidad de ascender hasta 1500 metros; más aún, la vaquita de San Antonio, sin decir ni mu, puede alcanzar hasta 2 kilómetros; algunas arañas pequeñas sobrevuelan por encima de nosotros dejándose llevar por el viento que arrastra sus telas finas y resistentes, aunque el récord lo tiene una termita que, para envidia de los Montgolfier, en 1961 fue capturada por un avión a nada más y nada menos que 5700 metros de altura.<sup>28</sup> Pero las aves son las que dominan. Se han observado gansos volando por encima del Himalaya, a más de 8500 metros de altura, aunque la mejor marca pertenece a un buitre griffon de rupell que en 1975 fue succionado por la turbina de un avión que sobrevolaba Costa de Marfil a 11 277 metros sobre el nivel del mar.<sup>29</sup>

El hombre recién logró llegar a la estratosfera en la década de 1930 gracias al desarrollo de globos de materiales sintéticos más livianos equipados con cabinas herméticas, lo que permitía alcanzar alturas superiores a los 30 kilómetros en vuelos tripulados y hasta 47 kilómetros en naves sin tripulación. En este sentido, vale la pena recordar el ascenso de Joseph Kittinger, quien, en agosto de 1960, vistiendo un traje presurizado precursor de los que más tarde usarían los astronautas, se elevó en un globo de barquilla abierta hasta los 31 333 metros, luego se arrojó en paracaídas y aún hoy ostenta los récords de mayor ascenso tripulado en globo, salto de mayor altitud y mayor velocidad de un ser humano en caída libre en la atmósfera (¡988 kilómetros por hora!).

Desde principios del siglo XX, el desarrollo de la aeronáutica condujo a la mejora de los aviones, esas máquinas que han demostrado ser muy útiles para desplazarse de un punto a otro del pla-

28 Krulwich, R., "Look up! The Billion-bug Highway You can't See", *Krulwich Wonders: An NPR Sciencey Blog*, disponible en <[www.npr.org/blogs/krulwich/2011/06/01/128389587/look-up-the-billion-bug-highway-you-cant-see](http://www.npr.org/blogs/krulwich/2011/06/01/128389587/look-up-the-billion-bug-highway-you-cant-see)> [visitado en enero de 2012].

29 Faraci, F. M., "Adaptations to Hypoxia in Birds: How to Fly High", *Annual Review of Physiology*, vol. 53, 1991, pp. 59-70.

neta, pero no lo han sido tanto para realizar vuelos de gran altura: los aviones actuales que llegan más alto no superan la mitad de la estratosfera. Adentrarse más en la atmósfera requirió una tecnología diferente: los cohetes. Konstantin Tsiolkovski, en Rusia, y Robert Goddard, en los Estados Unidos, diseñaron durante las dos primeras décadas del siglo XX cohetes para explorar la atmósfera y el espacio, no para que fueran utilizados como armamento. Su desarrollo posterior, luego de la Segunda Guerra Mundial, llevó a lograr proezas que los hermanos Montgolfier hubieran considerado imposibles, como colocar satélites en órbita, conquistar las capas superiores de la atmósfera y viajar a la Luna.

Quizás el lector atento haya tomado nota del hecho de que los vuelos en transbordadores espaciales se dirigen a la termosfera, lo que nos lleva a un interrogante: ¿cuántas veces los seres humanos abandonamos realmente nuestro planeta? Si consideramos que la atmósfera termina a unos 10 000 kilómetros del suelo, solamente los últimos once vuelos del programa Apollo de la NASA, el programa espacial que llevó al hombre a la Luna, lograron traspasar ese límite. Las misiones Apollo 7 a 17 llevaron fuera del planeta a los únicos treinta y tres hombres que realmente salieron de la Tierra.

## **El sonido del trueno**

Pero no nos vayamos por las ramas y volvamos a la atmósfera. El aire que la compone tiene la propiedad de transportar el sonido. Las ondas sonoras pueden viajar libremente en todos los medios, pero la velocidad a la que pueden hacerlo tiene un límite, y ese límite es lo que se denomina (de manera no demasiado original) velocidad del sonido. En el aire, esa velocidad depende de dos factores: la temperatura y la altitud. En ambos casos, se trata de una consecuencia de la cercanía entre las moléculas y de la energía que genera su movimiento, que es lo que determina la velocidad de la transmisión de las ondas de sonido. Por ejemplo, a nivel del mar, la velocidad del sonido es de 1234,8 kilómetros por hora a 20

grados centígrados y de 1225,1 kilómetros por hora a 15 grados centígrados, mientras que a 11 kilómetros de altura, al comienzo de la estratosfera, el sonido viaja a 1062 kilómetros por hora.

Pero la velocidad del sonido no impone un límite que deban respetar otras ondas u objetos en movimiento, como la luz, cuya velocidad de 300 000 kilómetros por segundo supera ampliamente al sonido en cualquier medio. El ejemplo clásico y más común es lo que permite diferenciar al relámpago del trueno. Aunque ambos tienen el mismo origen, al caer un rayo, el relámpago —o sea, la luz que emite— se propaga por el aire mucho más rápido que el trueno —es decir, su sonido—, por lo cual suele percibirse en momentos diferentes, según la distancia a la que nos encontremos respecto del lugar en el que el rayo hizo su descarga: si estamos muy cerca de ese punto, los sentiremos a la vez, en tanto que si nos alejamos un par de kilómetros, primero notaremos la luz y unos segundos después el sonido.

Muchas fábulas y leyendas intentan explicar este efecto con argumentos muchísimo más poéticos que la velocidad en la que se propagan las ondas, como aquella en la que el Diablo creó el trueno para asustar a todos los seres vivos, a lo que Dios respondió con la creación del relámpago como una luz blanca de alerta para avisar a sus hijos que no tuvieran miedo. Pero más allá de esto, lo cierto es que puede estimarse la distancia a la que cayó un rayo contabilizando los segundos que transcurren hasta que se oye el trueno. Como la velocidad del sonido es de 0,344 kilómetros por segundo, el trueno recorre cerca de un kilómetro cada 3 segundos; eso significa que si se divide por tres la cantidad de segundos que median entre el relámpago y el trueno, el resultado indica aproximadamente a cuántos kilómetros se produjo la descarga. Sin hacer tantas cuentas, también se suele aprovechar esa asincronía para estimar si una tormenta eléctrica se acerca o se aleja del lugar en el que estamos: cuando el chaparrón está acercándose, la diferencia de tiempo entre ambos resulta cada vez más corta, mientras que si se está alejando, el tiempo que media entre uno y otro es cada vez mayor.

Si alguna vez vieron volar un avión supersónico (es decir, aquel que supera la velocidad del sonido), sin duda habrán notado que el sonido que se escucha proviene del lugar por el cual la aeronave ya pasó. Cuando un vehículo alcanza la velocidad del sonido, se produce una variación extrema de presión que produce un estallido momentáneo que puede percibirse a cierta distancia. Además, si el aire está suficientemente húmedo, suele condensar el vapor de agua generando una nube alrededor del avión, efecto que se conoce con el complicado nombre de singularidad de Prandtl-Glauert (imagen 4).



**Imagen 4:** Singularidad de Prandtl-Glauert causada por un caza F-18 al cruzar la barrera del sonido.

La velocidad del sonido también se aprovecha en aeronáutica como referencia para indicar la velocidad de cualquier desplazamiento supersónico. El número de Mach indica cuántas veces un móvil supera la velocidad del sonido en cualquier medio. El 2 de junio de 2001, el avión supersónico X-43 de la NASA, el que mayor velocidad desarrolló hasta el momento, alcanzó un valor de

Mach 9,8, lo que significa que viajó a casi diez veces la velocidad del sonido y estableció el récord de 11 265 kilómetros por hora.<sup>30</sup>

No hay que olvidar que la velocidad del sonido cambia según la altura: un móvil que se desplaza a Mach 1 al nivel del mar tiene una velocidad mayor que uno que alcanza Mach 1 a varios kilómetros de altura.

Ahora bien, si de sonidos y velocidad límite se trata, no está de más señalar que los mayores estruendos de la historia se deben a erupciones volcánicas de gran magnitud. Se trata de ondas sonoras inmensas que viajan a la velocidad límite pero que, al tener mucha energía asociada, lo hacen con una intensidad abrumadora. El mayor estruendo del que se tiene noticia se produjo el 26 de agosto de 1883, tras la erupción del volcán más importante de los tres que tiene (o tenía) la isla Krakatoa: se escuchó hasta los 4800 kilómetros de distancia y su onda expansiva, según los registros barométricos, tuvo energía suficiente como para dar casi siete vueltas alrededor del planeta. También en la misma zona, en 1815, ocurrió la mayor explosión de los últimos diez mil años con la erupción del Tambora, un volcán de la isla de Sumbawa. Se estima que el fenómeno tuvo una potencia diez veces superior a la erupción del Krakatoa y generó una nube que cubrió el planeta durante dos días.

## **Azul un ala, del color del cielo**

Otra de las consecuencias de la presencia del aire es su capacidad para dispersar la luz. La dispersión es el desvío de la luz que provocan las partículas de polvo, las gotas de líquido o las moléculas de gas presentes en el aire. John Strutt, más conocido

30 McClinton, C. R., "X-43-Scramjet Power Breaks the Hypersonic Barrier", *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, contribución nº 317, 2006.

como Lord Rayleigh, descubrió que la luz visible se dispersa en diferentes longitudes de onda (los diversos colores) según el tamaño de las partículas. En las moléculas del aire, esta dispersión ocurre en longitudes de onda menores, que son las que corresponden a los tonos violeta y azul. En consecuencia, deberíamos ver el cielo de un color azul-violáceo. ¿Por qué, entonces, nunca vemos el cielo violeta? Porque nuestros ojos son mucho más sensibles al color azul y por eso lo distinguimos mejor.<sup>31</sup>

Cuando el Sol está cerca del horizonte, como el haz de luz debe atravesar un recorrido de aire mucho mayor, se dispersa mucho el azul y, por eso, vemos el astro rey con los colores restantes, que corresponden al típico rojo-anaranjado de los amaneceres y atardeceres. Este efecto aumenta cuando en la atmósfera hay partículas de polvo o cenizas (llamados en su conjunto aerosoles), que son las que otorgan esos colores más intensos a las salidas y puestas del Sol. En Krakatoa, tras la erupción del volcán y la consiguiente desaparición de la isla, el gran volumen de material expulsado por los aires causó que, durante meses, en muchas partes del mundo se observaran puestas de Sol con una amplia gama de colores: este incluso llegó a verse de color cobrizo, verde y hasta azul. Muchas de esas puestas de Sol fueron plasmadas por diversos artistas en varias pinturas, la más famosa de las cuales quizás sea *El grito*, de Edvard Munch.<sup>32</sup>

Debido a que en las capas superiores de la atmósfera hay una cantidad ínfima de aire, la dispersión es casi nula, por lo que la luz solar se ve como la mezcla perfecta de todos los colores, es decir, blanca. Este efecto hace que el cielo se vea con el color negro característico del espacio, lo que quiere decir que a esas alturas las estrellas resultan igualmente visibles tanto de día como de noche.

31 El tema se desarrolla en el libro *La ciencia del color*, de Ana von Rebeur, de esta misma colección.

32 Todo aquel interesado puede consultar el libro *Un científico en el museo de arte moderno*, de Luis Javier Plata Rosas, de esta misma colección, donde se detalla el tema.

## A brillar, mi amor

Si se la descompone en un medio adecuado, la luz blanca se desvía mostrando las zonas de diferentes longitudes de onda en ángulos levemente distintos. Este fenómeno se conoce como refracción y puede lograrse con diferentes medios, como el clásico prisma (¡otra vez Newton!), con cristales o con gotas de agua.

Cuando la luz del Sol incide sobre una gota de agua, la refracción la desvía y la descompone en siete colores: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta. La forma más común de ver ese efecto es en los arcoíris, que se producen cuando la luz solar atraviesa una zona donde está lloviendo, y cada gota del aguacero desvía los haces en un ángulo de 138 grados. Si la luz es suficientemente intensa y las gotas tienen el tamaño y la esfericidad adecuados, puede suceder que, dentro de cada gota, se produzca una nueva refracción, lo que genera un segundo arcoíris, cerca del primero, cuyos colores, más tenues, aparecen en el orden inverso. Se trata de un fenómeno poco usual llamado arcoíris doble. Incluso pueden haber arcoíris triples o cuádruples, en los que los haces de luz se refractan más veces dentro de la misma gota de lluvia, aunque es algo mucho menos común.

Pero la buena noticia es que no es necesario que llueva para que se forme un arcoíris; cualquier conjunto de gotas en las que la luz solar incida de manera adecuada es capaz de generarlo. Si tienen la suerte de visitar nuestras Cataratas del Iguazú en un día soleado, podrán observar cómo la gran cantidad de gotas de agua presentes en el aire producen arcoíris en infinidad de lugares, lo que da un aura casi mágica a un lugar de por sí hermoso.

La niebla baja e intensa también puede provocar un efecto similar en la cumbre de una montaña o en un lugar muy elevado, como la cabina de un avión. En esas condiciones, si estamos de espaldas al Sol y miramos hacia abajo, veremos alrededor de nuestra propia sombra un halo circular con los colores del arcoíris, cuyo centro está en la cabeza. Este fenómeno se conoce como

anillos de Ulloa, en honor a Antonio de Ulloa, quien lo explicó científicamente, aunque también ha sido llamado espectros de Brocken o glorias, debido a la reminiscencia “santa” que otorgaba el halo alrededor de la sombra de una persona (imagen 5).

El efecto de refracción también puede producirse en los cristales de hielo presentes en las capas altas de la atmósfera; así, el hielo de la troposfera puede generar una refracción de los rayos capaz de generar un arcoíris circular alrededor del Sol. Este fenómeno, conocido como halo, también puede ocurrir con la luz de la Luna y se lo denomina halo lunar; es más común en las zonas polares debido a la mayor probabilidad de que haya hielo en la atmósfera, aunque puede darse en cualquier parte del planeta con concentraciones inusuales de partículas de hielo, como sucede antes de algunas tormentas.

Un fenómeno atmosférico, más bien raro, es el arcoíris de fuego, generado también por la refracción de la luz. Los meteorólogos lo bautizaron como arco circunhorizontal (¿tienen que ponerle nombre difícil a todo?); se produce cuando los rayos del Sol refractan a través de cristales de hielo en nubes del tipo cirro, y cuando el Sol se encuentra en un ángulo superior a los 58 grados por encima del horizonte. El arco circunhorizontal no puede verse en lugares ubicados por sobre los 55 grados de latitud norte. Lo que se observa en este caso es un espectáculo bello e impactante: una zona del cielo con cirros iluminados con los colores del arcoíris.

Otro efecto óptico que le debemos a la refracción de la luz es el que se conoce como rayo verde. Cuando el Sol se pone sobre superficies tranquilas, como la del mar, y el aire está limpio y quieto, la diferencia en la velocidad con la que la luz atraviesa el aire más o menos denso de las diversas capas de aire hace que el haz de luz se descomponga y se arquee ligeramente siguiendo la curvatura del planeta. Como la luz verde-azul se inclina un poco más que la amarilla-roja, una vez que el Sol se oculta en el horizonte y sus rayos directos desaparecen, ¡por unos segundos se siguen viendo esos rayos verdes!



**Imagen 5:** Anillos de Ulloa o glorias: alrededor de la sombra del fotógrafo (arriba), y alrededor de la sombra del avión desde el que fue fotografiada (abajo).

Ahora que ya sabemos cómo está formada nuestra atmósfera, estamos en condiciones de seguir adentrándonos en su mundo (que también es el nuestro). Es hora de verla en acción...

### 3. La atmósfera en acción

#### Vivaldi y el ecuador

Entre 1723 y 1725 el músico italiano Antonio Vivaldi compuso la obra *Il cimento dell'armonia e dell'invenzione* [La lucha entre la armonía y la invención], una serie de doce conciertos que conforma un ejemplo “de manual” de lo que en música clásica se conoce como estilo barroco. Pero mucho más famosos que la obra en sí son sus primeros cuatro conciertos, *Las cuatro estaciones*, que evocan con gran majestuosidad las estaciones del año. Lo que Vivaldi sin duda no sabía es que, de no ser por el choque postulado entre la Tierra y el planeta Theia, hace más de 4000 millones de años, su obra hubiese sido completamente diferente.

Una de las posibles consecuencias de esa colisión fue que el eje de rotación terrestre quedó inclinado, un cambio tremendo al que nuestro planeta tuvo que adaptarse. Pero no todo en el mundo son malas noticias: gracias a esta colisión, la Tierra tiene la particularidad de calentarse más en el hemisferio que está inclinado en dirección al Sol y menos en el que lo hace en sentido contrario. A medida que la Tierra gira alrededor del astro, el hemisferio contrario queda más expuesto al Sol, y esto hace que existan las diferentes estaciones del año.

Otra consecuencia es que los polos nunca se orientan directamente hacia los rayos solares, por lo que el calor que estos transportan se esparce muchísimo más, ya que deben atravesar la atmósfera inclinándose con un cierto ángulo, lo que implica recorrer una capa de aire bastante mayor hasta llegar a la superficie. Es

por eso que, en esas latitudes, la Tierra pierde mucho más calor del que recibe del Sol.

El caso opuesto es la zona ecuatorial, que durante todo el año está expuesta a la misma cantidad de radiación solar: no se perciben diferencias entre las cuatro estaciones, y nuestro planeta recibe allí más radiación de la que pierde. Si Vivaldi hubiese vivido bastante más al sur de Italia, *Las cuatro estaciones* hubiese sido una obra musical más homogénea (y también mucho más breve).

### **Viento, dile a la lluvia**

La diferencia de temperatura entre la zona ecuatorial y los polos es el motor para que la atmósfera se encargue de distribuir el calor por todo el planeta, acción que se da casi exclusivamente en la troposfera. El aire caliente y húmedo de la zona ecuatorial asciende, pues es más liviano, y al llegar a la tropopausa se dispersa hacia los polos, enfriándose en el camino. Como consecuencia del enfriamiento, se hace más denso, por lo que desciende y se dirige otra vez al ecuador, donde el aire caliente que se eleva le deja lugar a ese aire más fresco que está volviendo; así, se establece en todo el globo una circulación de aire que llega hasta los 30 grados de latitud norte y sur para luego volver. A esa latitud, el aire caliente regresa con mucha menos humedad, lo que favorece la formación de desiertos, como el del Sahara. Este flujo de aire, denominado circulación de Hadley, se dirige, debido al sentido de rotación del planeta (el llamado efecto Coriolis) hacia el sudoeste en el hemisferio norte y hacia el noroeste en el hemisferio sur, y da lugar a un movimiento global de masas de aire: los vientos alisios.

Por encima de los 30 grados de latitud (norte y sur), la circulación de aire se ve afectada por las corrientes en chorro, de las que ya hablamos, que actúan a gran velocidad en lo alto de la troposfera. La combinación de ambas circulaciones de aire, sumadas al

efecto de rotación, producen corrientes ondulares de aire llamadas ondas de Rossby, que son las encargadas de llevar aire caliente hacia los polos y acercar aire frío al ecuador. Hadley, Coriolis y Rossby: una delantera imbatible.

Este panorama general permite entender la distribución general del calor del Sol a escala planetaria, que ustedes suelen notar a menudo en algo bien conocido, aunque la descripción pueda parecerles un poco grandilocuente: el viento.

Los vientos son el resultado de los desplazamientos de masas de aire desde una zona de mayor hacia otra de menor presión, y es el mecanismo mediante el cual la atmósfera logra mantener el equilibrio en las distintas regiones del globo, aunque a veces esto signifique que algunas masas de aire puedan llegar a tener una potencia extremadamente destructiva.

## **Lo que mata es la humedad**

Otro factor importante relacionado con el desplazamiento del aire y con la temperatura es el agua. Este compuesto (sin duda el más importante para el desarrollo de la vida en nuestro planeta) posee muchas propiedades peculiares, pero una de ellas resulta central a la hora de estudiar el clima, y es su capacidad calorífica, es decir, su aptitud para transportar calor, que la vuelve muy superior a casi todos los restantes compuestos naturales. A esto se suma su cualidad de poder pasar por todos los estados (sólido, líquido y gaseoso) en condiciones atmosféricas normales, y otra propiedad curiosa: la de ser menos densa en estado sólido que líquido, razón por la cual el hielo puede flotar en el agua. Si bien esto puede parecerles un tanto común, es algo bastante raro entre las sustancias.

La humedad es el agua que forma parte del aire y es muy importante porque le da un mayor peso, lo que implica una mayor presión. Cuanto más caliente sea el aire, más cantidad de agua podrá incorporar. (Si alguna vez sufrieron la pesadez

de esos días húmedos de verano, saben a lo que nos estamos refiriendo.)

A pesar de ser como máximo sólo el 4% del aire, es el componente que determina las variaciones climáticas. Cuando el aire caliente asciende, arrastra y se lleva muchas moléculas de agua, lo que genera una zona de presión baja. Esto puede darse en cualquier lugar, no sólo en el ecuador: el calentamiento no es uniforme en todos los puntos del planeta, por lo que un área de baja presión puede ocurrir en cualquier latitud. Sólo hace falta que haya un sistema cercano con una presión un poco mayor para que toda su gran masa de aire se desplace hacia allí, llevando a su paso viento y (a menudo) agua, a fin de igualar las presiones y restaurar el equilibrio atmosférico.

La humedad relativa es la forma de medir la cantidad de agua que posee el aire y surge de un cálculo entre la cantidad de vapor de agua que contiene el aire y la máxima cantidad que puede llegar a tener. Eso quiere decir que, cuando escuchamos en la radio que hay un 100% de humedad relativa, el aire no puede admitir más agua, pero esto no debe confundirse con la proporción de agua que, en efecto, tiene (que, como ya dijimos, suele ser menor al 4%). El valor de la humedad relativa depende de la temperatura, pues, como vimos, cuanta más temperatura tenga el aire, mayor será el límite de agua que admita.

### **Aquella solitaria vaca**

Seguramente muchos lectores conocen muy bien el ciclo del agua en la naturaleza, uno de los temas recurrentes que aprendimos en la escuela primaria y que nos muestra cómo, gracias a la energía que aporta el Sol, parte del agua superficial de los océanos y diferentes espejos de agua se evapora y asciende como humedad para eventualmente condensarse y/o congelarse formando nubes y luego volver a la superficie en la forma de lluvia, nieve o granizo... Todo esto, según las ilustraciones de los libros de texto, con una vaca pastando

a orillas de la costa como único testigo (ese es el problema de usar estereotipos sin razón alguna: pareciera que a las vacas les interesa mucho más el ciclo del agua que al resto de los seres vivos).

Además de la poca originalidad de los manuales escolares, el ciclo del agua da cuenta de la influencia de los océanos sobre el clima global. Sin desmerecer a los ríos, los lagos, las lagunas, los arroyos o los charquitos, en comparación los océanos conforman una masa de agua inmensa: el 97% del agua del planeta está en los océanos y, si nos limitamos a su superficie, el 60% de la extensión actual del planeta es agua oceánica. Tanta agua ha de tener algún efecto sobre el clima, ¿no creen? Pues bien, todos los océanos poseen corrientes de circulación de agua, similares a las de aire, producto de las diferencias de temperatura, de la salinidad de los mares y del efecto de la rotación terrestre.

Las corrientes cálidas transportan el calor hacia los polos desde el ecuador, y las frías el agua fría desde los polos hacia latitudes menores. El agua, como dijimos antes, es un medio excelente para transportar el calor, y más aún cuando contiene sales disueltas, que son las que le dan una mayor capacidad calorífica. Es por eso que la salinidad de los océanos es un factor de peso en la dinámica de circulación de las corrientes oceánicas. En realidad se trata del sistema aire-océano que, en conjunto, transporta la energía que la Tierra recibe del Sol y produce, en ese proceso, todas las variaciones climáticas que el entorno permita.

Uno de los ejemplos más destacados de esta dinámica son los ciclos conocidos como corriente del niño y de la niña. La primera suele producirse de manera irregular en la época de la Navidad (de ahí su nombre, en honor al niño Jesús), cuando la variación de la salinidad del océano causada por los cambios en las corrientes oceánicas produce una presión atmosférica más baja que la usual en la zona este del océano Pacífico, en la región que abarca Perú y Ecuador. Esto hace que los vientos alisios disminuyan, lo que permite que el aire acumule más agua oceánica en su camino hacia la costa oeste de Sudamérica. Esa combinación de presión baja con aire más húmedo y cálido provoca una mayor cantidad e intensidad de lluvias

y, en consecuencia, en el océano Índico es época de sequía mientras que en Oceanía y el sudeste de Asia suelen ser temporadas bastante lluviosas.<sup>33</sup>

La corriente de la niña, un fenómeno menos periódico que el de su par masculino, es lo contrario, es decir, el aumento de los vientos alisios del este que lleva sequía a Sudamérica y lluvias al sur de Asia. Ambos modifican el sentido de circulación de las corrientes oceánicas y profundizan aún más las diferencias de temperatura.

### **Había una vez unas nubes**

Las nubes, quizás el elemento más representativo del cielo, se forman debido a que, al subir, el vapor de agua que compone el aire sufre los efectos del descenso de la temperatura: cuando llega al punto de saturación del aire se condensa en forma de gotas de agua líquida y, si la temperatura es más baja, puede llegar a solidificarse en cristales de hielo.

Se calcula que el 50% de los cielos del planeta suelen estar cubiertos por nubes,<sup>34</sup> por lo que se las considera íconos atmosféricos, además de fuente de inspiración de muchísimos filósofos, científicos y artistas. De hecho, para algunos, el arte de representarlas es un subgénero pictórico con todas las de la ley. Uno de los pintores con mayor renombre en lo que a pintar nubes se refiere es John Constable, quien, además de dejarnos una magnífica obra, inspiró con sus pinturas a quien hoy es considerado el padre de la meteorología, Luke Howard.

En 1803 Howard desarrolló un sistema para clasificar los distintos tipos de nube, taxonomía que, con algunas actualizaciones, perdu-

33 Este tema se trata más a fondo en el libro *El mar*, de Javier Calcagno y Gustavo Lovrich, de esta misma colección.

34 Martínez, L. y otros, "Estudio de la precisión y tiempo de proceso en la detección nubosa mediante tres métodos", *Revista de Teledetección*, n° 14, 2000, pp. 1-5.

ra hasta la actualidad. Así, las nubes se dividen, según sus características, en cuatro categorías:

- Cúmulos: las que aparecen bien definidas y esponjosas.
- Estratos: las nubes chatas, de baja altitud y sin forma definida. Desde la Tierra tienen el aspecto de una niebla suspendida: el clásico cielo encapotado.
- Cirros: nubes muy elevadas y livianas que se caracterizan por mostrar bandas finas que parecen hilachas.
- Nimbo: denominación que reciben las nubes que traen lluvia, que a su vez se subdividen en nimboestratos (de desarrollo horizontal) y cumulonimbos (de desarrollo vertical). Suelen formar impresionantes columnas densas y esponjosas en muchísimas tormentas, y en su interior a menudo contienen intensos torbellinos que, en ciertas condiciones, pueden dar lugar a la formación de un tornado.

Para todas ellas se utilizan otros prefijos que señalan la altitud de la nube, como los términos “alto” (por ejemplo, altocúmulos, altoestratos) para indicar la altura media de la troposfera, o “cirro” para designar a las nubes que aparecen en la zona troposférica más alta (como cirrocúmulos o cirroestratos; véanse las imágenes 6 y 7).

Lo que habitualmente llamamos niebla no es más que la formación de una nube al condensarse el agua de una capa de aire superficial. Sus gotas tienen un diámetro que oscila entre 1 y 50 micrones<sup>35</sup> y, cuando mide menos que eso, se la denomina neblina, aunque sigue siendo lo mismo.<sup>36</sup>

35 Para que se den una idea de cuánto es esto, si una gota de neblina fuera como una bolita (o canica), la de niebla tendría el diámetro de un globo de cumpleaños, la de llovizna 4 metros y la de lluvia algo así como 50 metros.

36 Lawrence E. y Van Loon, B., *Fenómenos atmosféricos*, Barcelona, Cúpula, 1994, p. 61.



**Imagen 6:** Distintos tipos de nubes: cúmulos (arriba), nimboestratos (abajo).



**Imagen 7:** Distintos tipos de nubes: cumulonimbo (arriba) y cirros (abajo).

## Sube a mi fábrica de nubes

En algunas situaciones particulares, ya sea por las características geográficas o por la dirección del viento, suelen aparecer algunas nubes bastante peculiares. Veamos algunos ejemplos:

- Nube morning glory: tiene forma de rollo, suele aparecer a principios de la primavera y casi exclusivamente en el golfo de Carpentaria, al norte de Australia. Si bien no se conoce con exactitud la mecánica con la que se forma, se cree que se debe a la combinación de la brisa marina de la región con los sistemas de viento frontales y las altas presiones imperantes. Suele tener hasta 2 kilómetros de altura y ha llegado a extenderse hasta cerca de mil kilómetros (imagen 8).



**Imagen 8:** Nubes morning glory en la zona de Burketown, Australia.

- Mamma: también conocida como *mammathus* o nube mastodóntica. Cuando las gotas de lluvia y el granizo de una nube grande, como un cumulonimbo, se concentran en su base, acumulan un peso que se percibe

en forma de bolsas similares a pechos, lo que da lugar a su nombre (imagen 9).



**Imagen 9:** Mamma fotografiada sobre la ciudad de Rosario, Argentina.

- **Pileo:** es un tipo de nube pequeña y vaporosa que aparece en condiciones de mucha humedad, durante un tiempo breve, por encima de una nube espesa y voluminosa, como un cúmulo o un cumulonimbo, que se está elevando hacia una capa de aire que se desplaza horizontalmente. La humedad comienza a condensarse en la zona donde convergen la nube y la corriente horizontal formando esa nube que pronto pasará a integrar el cúmulo (imagen 10).
- **Nubes lenticulares:** suelen formarse cuando una nube se encuentra con una corriente de aire húmedo ascendente muy ordenada (llamada laminar). Como el aire es bastante estático pueden permanecer durante horas en el mismo lugar, lo que les da una misteriosa apariencia ovalada, hecho por el cual muchas veces se las confunde con ovnis (imagen 11).



**Imagen 10:** Una nube pileo encima de un cúmulo sobre la ciudad de Rosario, Argentina.



**Imagen 11:** Nube lenticular sobre Palm Desert, California, Estados Unidos.

- **Nubes Kelvin-Helmholtz:** se desarrollan cuando una nube común queda a merced de dos capas de aire que circulan una por encima de la otra a distinta velocidad. De esta manera, el viento genera el movimiento en forma de olas a punto de romper que las caracteriza (imagen 12).



**Imagen 12:** Nubes Kelvin-Helmholtz en el Monte Duval, Australia.

## **Un tornado arrasó a mi ciudad**

El ciclo provocado por el reparto de la energía del Sol a lo largo y a lo ancho de todo el planeta implica una cantidad de energía difícil de imaginar cuando se la considera en conjunto. Sin embargo, muchas veces la humanidad es, y ha sido, testigo de la fuerza tremenda que puede llegar a desatarse en el eterno intento de nuestra atmósfera por equilibrar las temperaturas. Dentro de ese grupo de fenómenos, tan espectaculares como catastróficos, se encuentran los tornados y los huracanes.

Para que se forme un tornado, es necesario que haya un tipo de tormenta conocida como supercelda (imagen 13). Se trata de tormentas con nubes cumulonimbos que abarcan prácticamente toda la altura de la troposfera y en cuyo interior hay vórtices de aire en rotación denominados mesociclones. Los tornados

ocurren cuando una corriente de aire seco y frío (el caso más común y extremo corresponde a las corrientes en chorro) se encuentra con otra de aire húmedo y cálido y se desplaza por encima de ella. Mientras se da ese proceso, va formándose esta tremenda tormenta. Cuando el vórtice se ubica verticalmente y las corrientes internas tienen mucha velocidad, en el interior del mesociclón se produce un descenso muy marcado de la presión capaz de generar el efecto de vórtice de aire que conocemos como tornado.

Los tornados se encuentran entre los vientos de nuestro planeta que pueden alcanzar mayor velocidad y llegan a valores que superan los 500 kilómetros por hora.<sup>37</sup>



**Imagen 13:** Una supercelda sobre Nuevo México, Estados Unidos.

37 Lawrence, E. y Van Loon, B., ob. cit., p. 89.

Si bien pueden formarse en cualquier parte del mundo, la mayoría se da en el llamado callejón de los tornados (*tornado alley*), una zona de los Estados Unidos ubicada entre las montañas Rocallosas y los montes Apalaches. Allí, en otoño y primavera, las condiciones climáticas son particularmente favorables para que se produzcan tornados, dado que las Rocallosas bloquean la humedad del aire, causando una sequedad que genera una zona de baja presión, mientras que el golfo de México aporta el otro ingrediente necesario para la formación de las supercel-das: aire cálido y húmedo.

En Sudamérica se encuentra la segunda región del planeta en incidencia de tornados, el llamado pasillo de los tornados, que abarca desde Cuyo y el noroeste de la Argentina hasta Uruguay y los estados del sur de Brasil. En esa zona la cordillera de los Andes tiene un efecto equivalente al de las Rocallosas, mientras que el océano Atlántico aporta el aire húmedo.

Algunos tornados, cuyo vórtice presenta una potencia bastante menor, se forman a partir de otros tipos de nubes cúmulo menos densas y energéticas y en climas no tan rigurosos como los de una supercelda. Se los denomina trombas y, según el lugar en el que se produzcan, se los clasifica como trombas terrestres o marinas. Cuando un tornado se da sobre un espejo de agua, puede dar lugar a una tromba marina que se denomina tornádica para diferenciarla de las otras trombas marinas e indicar su origen y el poder destructivo que tiene.

Los tornados se clasifican siguiendo la escala de Fujita (EF), que mide su capacidad para destruir estructuras. Sus valores van desde 0, que indica daños leves (como cuando arrasa con los árboles, pero no con las estructuras edilicias), hasta 5 (por ejemplo, cuando arranca una casa con sus cimientos). Si bien en teoría la escala contempla valores mayores, por suerte nunca se han producido tornados con un valor superior a EF5. El mayor tornado del que se tiene registro es el Triestatal, que azotó a los Estados Unidos el 18 de marzo de 1925 y dejó un

saldo de casi setecientos muertos.<sup>38</sup> El peor tornado de Sudamérica, y el único EF5 registrado en Latinoamérica y el Caribe, se produjo el 10 de enero de 1973 en San Justo, provincia de Santa Fe, y dejó un saldo de sesenta y tres muertos.<sup>39</sup>

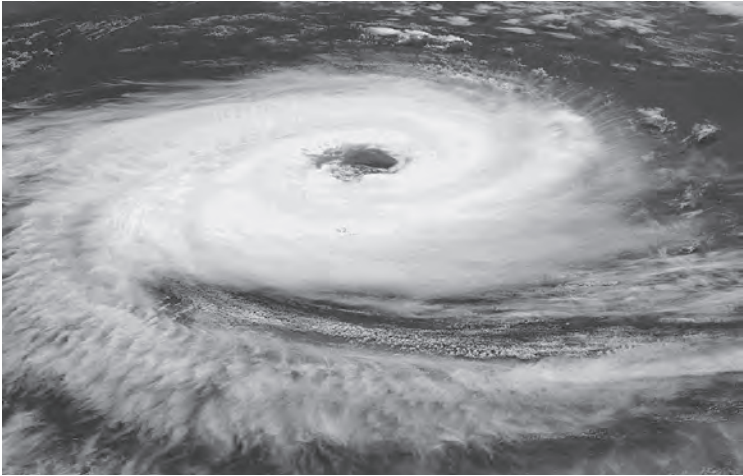
## Lo que el viento se llevó

Un huracán se origina en un conjunto de tormentas que rota alrededor de un centro de baja presión. Este fenómeno se llama ciclón tropical debido a que se da exclusivamente en la zona intertropical. Grandes cantidades de agua oceánica, que allí es más cálida, se evaporan y luego se condensan generando en la atmósfera muchas gotas de agua líquida y liberando el calor que transportan. Eso hace que el aire de los trópicos, de por sí cálido, eleve más aún su temperatura, lo que provoca una suerte de chimenea de aire caliente que se mueve hacia el exterior y regresa a la superficie en forma de vientos fuertes, que hacen que la zona se cubra de una gran cantidad de nubes cumulonimbos que acarrean toda el agua condensada. El ciclón recibe distintos nombres, dependiendo de la fuerza de los vientos. Así, puede tratarse de una depresión tropical, de una tormenta tropical o de un huracán (o tifón, que es como se los denomina al oeste del Pacífico).

Otra de sus características es que, en su centro, se forma un ojo, cuyo tamaño, en función del que tenga el ciclón, oscila entre los tres y los más de trescientos kilómetros. El ojo es una corriente de circulación de aire descendente más cálida que no tiene nubes (imagen 14).

38 Burgess, D. W., "The Tri-state Tornado of 18 March 1925, Part I: Re-examination of the Damage Path", *23<sup>rd</sup> Conference on Severe Local Storms*, contribución n° 18, 2006.

39 *Libro de los récords Guinness 1997*, Buenos Aires, Tres Editores, 1997, pp. 26-27.



**Imagen 14:** Imagen desde el espacio del huracán Catarina, que azotó la costa de Brasil en marzo de 2004. En el centro se observa claramente su ojo característico.

Cuando el huracán llega a tierra, comienza a debilitarse porque pierde su principal fuente de energía (la evaporación y condensación del agua oceánica), aunque a veces avanza tierra adentro hasta agotarse por completo. Los huracanes se clasifican mediante la escala de Saffir-Simpson, basada en la velocidad de los vientos, y van del nivel 1 (entre 119 y 153 kilómetros por hora) al 5 (vientos mayores a los 250 kilómetros por hora).

El huracán más letal que se haya registrado es el ciclón Bhola, que afectó el este de Pakistán (actual Bangladesh) el 13 de noviembre de 1970.<sup>40</sup> Además de la destrucción que causaron los vientos, produjo muchísimas inundaciones que dieron

40 Tatham, P. y Spens, K., "Cyclones in Bangladesh: A Case Study of a whole Country Response to Rapid onset Disasters", *Proceedings of the POMS 20<sup>th</sup> Annual Conference*, contribución n° 011-0029, 2009.

como resultado una cantidad de muertos que, según las distintas fuentes, oscilaron entre los quinientos mil y el millón de personas.<sup>41</sup>

### **Cosecharás tu siembra**

Como ya vimos, las nubes nacen de la condensación del vapor de agua en la atmósfera. Este efecto se ve favorecido cuando el aire contiene partículas sólidas suspendidas en las que el agua sobre-enfriada, o sea aquella que se encuentra en estado gaseoso a una temperatura un poco menor que su punto de condensación (es decir, en condiciones en las que suele ser líquida), se condensa formando gotas. A partir de esta propiedad, Vincent Schaefer y Bernard Vonnegut idearon métodos para condensar artificialmente el agua de la atmósfera; el primero utilizando hielo seco como fuente de enfriamiento y, el segundo, yoduro de plata como núcleo de condensación. La técnica se denominó siembra de nubes y ha sido utilizada con relativo éxito desde 1946.

Para llevarla a cabo, los productos químicos pueden dispersarse en forma de bengalas desde aviones o cohetes, o desde generadores en tierra que dispersan las partículas en el viento ascendente. Otro producto que se puede usar es el cloruro de sodio (la conocida sal de mesa) que, si bien no sirve para generar nubes a partir del aire húmedo, resulta efectivo para aumentar el tamaño de las gotas en nubes ya formadas y provocar precipitaciones. Esta técnica tiene diversos usos, como el que le dieron los Estados Unidos entre 1967 y 1972, cuando sembraron nu-

41 Las fuertes críticas que se le hicieron al gobierno pakistaní por el manejo del desastre condujeron a un malestar político entre el gobierno central y Pakistán oriental que, finalmente, terminó provocando la creación del Estado de Bangladesh. Por esta razón, al Bhola se lo conoce como el ciclón que creó un país.

bes sobre Vietnam del Norte<sup>42</sup> para aumentar la duración de la temporada de los monzones, un tipo de vientos estacionales con lluvia muy intensa del sur de Asia, durante la guerra homónima. Actualmente se la utiliza para aumentar las precipitaciones en zonas muy secas, para inducir nevadas en centros de esquí, o para evitar la formación de niebla en las cercanías de los aeropuertos. En nuestra provincia de Mendoza, el gobierno la aplica para evitar o reducir la formación de granizo.<sup>43</sup>

Un fenómeno similar de condensación artificialmente inducida suele ocurrir en los escapes de las turbinas de los aviones. Uno de los productos que emiten los escapes es agua, que satura el aire en las proximidades; si este ya posee bastante humedad, comienza a condensarse y/o congelarse y deja una estela detrás del avión. Según la humedad y las corrientes de aire, esas estelas pueden permanecer bastante tiempo en el cielo. Las nubes artificiales así formadas poseen las características de los cirros, y por eso han sido bautizadas *cirrus aviaticus*.

A grandes alturas, también pueden generarse estelas de vapor en las alas de los aviones, debido a que su perfil está diseñado para crear una diferencia de presión entre la parte superior y la inferior que, cuando la aeronave se desplaza hacia adelante, causa una fuerza que impulsa el ala (y por ende el avión) hacia arriba. Asimismo, esa diferencia de presión puede provocar un descenso de la temperatura en la zona del ala, capaz de causar la condensación del agua atmosférica. De esta forma también pueden generarse estelas de vapor que surgen directamente de las alas de la aeronave, además de las que se originan en los escapes de las turbinas.

42 Troung y otros, "Laos, 1948-1989, Part 2", *Air Combat Information Group*, artículo 348, 2003.

43 Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas del Gobierno de la Provincia de Mendoza, "Sistema Integral de Lucha Antigranizo", disponible en <[www.contingencias.mendoza.gov.ar/lucha\\_objetivos.php](http://www.contingencias.mendoza.gov.ar/lucha_objetivos.php)> [visitado en enero de 2012].

## Sobre llovido, mojado

Ven a mí, te necesito, ven a mí.  
Desde que te fuiste estoy sediento, sediento de ti.  
Empápame, mójame todo, te lo ruego,  
¡ay!, te necesito, vuelve a mí, por Dios, sediento estoy.  
Humedéceme, salpicame, rocíame, riégame, chorréame,  
nebulízame, vaporízame, escúpeme,  
mas no me dejes, lluvia linda, nena, chiquita...  
sin ti.

**Les Luthiers, *Danza de la lluvia*<sup>44</sup>**

Uno de los preceptos principales del ciclo del agua en la naturaleza, además de la presencia de la vaca, es la condensación del agua para formar nubes y su posterior precipitación para volver a la superficie y así asegurar eternamente el ciclo. Dado que ya hablamos de las nubes en todas sus formas, ahora vamos a profundizar un poco en la lluvia.

Sin duda todos hemos experimentado alguna vez la lluvia, a menudo muy deseada y, al rato, bastante detestada. Para que sea lluvia propiamente dicha, las gotas deben medir más de 1 milímetro de diámetro. Ese diámetro les permite llegar hasta la superficie desde una nube que se encuentra a un kilómetro de altura. Si fueran más pequeñas, se evaporarían antes de tocar el suelo por el calor que genera el roce con las moléculas del aire.

Las gotas de la llovizna o garúa poseen diámetros mucho menores (0,4 milímetros promedio) y suelen provenir de nubes más bajas, lo que les permite alcanzar la superficie a través del aire frío y húmedo, que además hace que su evaporación sea más lenta. En precipitaciones de este tipo, a veces las gotas desapare-

44 Fragmento del número "Cartas de color", de la obra de teatro musical *Muchas gracias de nada* (1980).

cen antes de tocar la superficie, un fenómeno denominado virga que podría describirse como una llovizna que no llegó al suelo.

La forma más usual de determinar la intensidad de las lluvias es medir con un pluviómetro los milímetros de agua que se acumulan en un metro cuadrado durante una hora. Según la cantidad que caiga, las lluvias se clasifican en débiles, moderadas, fuertes, muy fuertes y torrenciales (temporal, chaparrón o aguacero son términos que se usan en las diferentes regiones para describir una tormenta muy intensa).

El mayor aguacero registrado en un día ocurrió entre el 15 y el 16 de marzo de 1952 en Ciliaos, en la isla La Reunión, donde cayeron 1870 milímetros.<sup>45</sup> Sin embargo, ese no es el lugar más lluvioso del planeta: si estaban pensando en viajar al monte Wai-ale-ale, en Hawái, no se olviden de llevar paraguas, pues allí, en promedio, llueve unos 350 días al año. Por el contrario, la zona más seca del planeta es el desierto de Atacama, en Chile, donde en promedio llueve una vez cada quince años. En nuestro país, la mayor precipitación registrada en veinticuatro horas hasta ahora fue de 359 milímetros y tuvo lugar en Gualeguaychú, Entre Ríos, el 29 de abril de 1912.<sup>46</sup>

Algunas nubes de tormenta del tipo cumulonimbos pueden producir granizo en lugar de lluvia. Los cristales de hielo alojados en la nube son agitados hacia arriba y hacia abajo por las corrientes de aire que contiene y el agua sobreenfriada comienza a condensarse sobre esos pequeños cristales, y luego se congela y se convierte en esas bolitas de hielo que llamamos granizo.

Si el granizo no es muy grande, al rozar el aire durante su caída libre puede descongelarse y transformarse en lluvia; pero si tiene un tamaño mayor, y las condiciones (temperatura, altura de la nube, etc.) lo permiten, llega en estado sólido a la superficie, para desgracia de los que estacionaron sus autos en la calle.

45 *Libro de los récords Guinness*, ob. cit.

46 *Ibíd.*

El tamaño del granizo normalmente ronda entre los 5 milímetros y 5 centímetros de diámetro, aunque en ocasiones las piedras pueden ser mayores y causar incluso algunas muertes. En Moradabad, India, el 20 de abril de 1888 hubo una granizada que dejó el saldo récord de 246 muertes.<sup>47</sup> Sin embargo, la piedra de granizo más grande de la que se tiene noticia, de unos 20 centímetros de diámetro y un peso cercano a los 880 gramos, cayó en julio de 2010 en Vivian, Dakota del Sur, en los Estados Unidos.<sup>48</sup>

El otro fenómeno en el que el agua cae en estado sólido es la nieve. Se trata de cristales de hielo que se unen entre sí formando copos que precipitan hacia la superficie. Para mantener su estructura sólida cristalina intacta al caer, tanto el aire como la superficie deben tener una temperatura muy baja (inferior a los 0 grados centígrados). El granizo, por el contrario, posee una estructura amorfa (no de cristales) y puede precipitar incluso en climas cálidos. Cuando hay nieve pero el aire no se enfría lo suficiente, parte de los copos se derriten durante su caída y llegan a la superficie en forma de hielo a medio fundir, lo que se conoce como aguanieve.

En lo que a nieve se refiere, existe un caso poco habitual, la lluvia engelante, lluvia congelada o tormenta de hielo (imagen 15), que se da cuando la nieve, al comenzar a caer, cruza una corriente más cálida y se funde convirtiéndose en lluvia, pero luego esa lluvia, antes de llegar a la superficie, atraviesa otra corriente de aire —en este caso fría— que da como resultado una lluvia conformada por agua sobreenfriada —es decir, agua que se encuentra en estado líquido a una temperatura un poco menor a su punto de congelación—. Ese estado, como podrán suponer, es muy inestable, por lo que cualquier modificación abrupta de la temperatura del agua provoca su solidificación. En la lluvia

47 *Ibíd.*

48 Buchanan, S., "South Dakota Storm Produces Record Hailstone", *Informe de NOAA*, 30/7/2010, disponible en <[www.crh.noaa.gov/crh/pdf/073010RecordHailVivianSD.pdf](http://www.crh.noaa.gov/crh/pdf/073010RecordHailVivianSD.pdf)> [visitado en enero de 2012].

engelante, ese cambio se da cuando las gotas golpean contra lo que está en la superficie y se congelan instantáneamente, lo que da a los objetos una apariencia irreal.



**Imagen 15:** Efecto de la lluvia engelante sobre la vegetación.

**¡Rayas y centollas!... digo, ¡rayos y centellas!<sup>49</sup>**

En abril de 1942, Roy C. Sullivan, un guardia forestal de Virginia, en los Estados Unidos, perdió una uña del pie tras ser alcanzado por un rayo. Veintisiete años más tarde, en julio de 1969, perdió las cejas y quedó inconsciente cuando otro rayo volvió a alcanzarlo mientras conducía su camioneta descapotable. Un año más tarde, frente a su casa, un tercer rayo le dejó quemaduras en el hombro izquierdo. En abril de 1972 un cuarto rayo lo dejó pelado y, cuando el pelo ya le había vuelto a crecer, volvió a perderlo de la misma forma en agosto de 1973, oportunidad en la que también sufrió quemaduras en sus piernas. En junio de 1976 un sexto rayo le dejó heridas en un tobillo y, por último, el 25 de junio de 1977, mientras estaba pescando, otra vez fue alcanzado (aunque, a esta altura, deberíamos hablar más de acoso que de alcance) por un rayo que le produjo quemaduras en el pecho y el estómago. Los estudiosos aún no se han puesto de acuerdo acerca de si Sullivan, quien finalmente se suicidó en 1983, no porque estuviera harto de que le cayeran rayos sino, al parecer, por un desengaño amoroso,<sup>50</sup> era el hombre más afortunado del mundo o el más desgraciado. (¿A qué se deben estas dos interpretaciones? En todo el planeta caen a diario unos cuarenta rayos por segundo;<sup>51</sup> por eso no resulta tan raro que, al año, mueran unas mil personas por esta causa.) Sin embargo, que a una misma persona le caigan siete y, además, que no muera, no deja de ser sorprendente.

49 Alusión a la obra *Las majas del bergantín*, de Les Luthiers, en la que uno de los marineros grita: "¡Rayos y centellas!", a lo que el capitán pregunta: "¿Qué ocurre?", y el marinero responde: "No, en el agua, ¡rayas y centollas!... ¡Y caracoles!".

50 *Libro de los récords Guinness*, ob. cit.

51 Earth System Research Laboratory, "Annual Lightning Flash Rate", NOAA, 2009, disponible en <[sos.noaa.gov/datasets/Atmosphere/lightning.html](https://sos.noaa.gov/datasets/Atmosphere/lightning.html)> [visitado en enero de 2012].

El mecanismo que provoca los rayos se inicia de la misma forma en que se produce el granizo. Las corrientes de aire internas de las nubes de tipo cumulonimbos van formando el granizo que, por la fuerza de gravedad, se dirige hacia la parte inferior de la nube. En el proceso de caída, las partículas más pesadas rozan con lo que encuentran a su paso, lo que provoca que atrapen algún que otro electrón de esos pequeños objetos con los que chocan. Esos electrones le confieren una carga negativa a los núcleos de granizo que se acumulan en la base de la nube y, por ende, toda esa parte de la nube pasa a tener ese tipo de carga. Simultáneamente, esas partículas más pequeñas, al perder sus electrones, adquieren una carga positiva que se acumula en la parte superior de la nube (aunque parezca increíble, la ciencia aún no ha podido explicar del todo el mecanismo que hace que todo esto ocurra).

En resumen, cada una de las nubes de tormenta posee una carga positiva en la parte superior y una carga negativa en su base. Según las leyes de la electricidad, las cargas opuestas se atraen y las del mismo signo se repelen. En consecuencia, el área que se encuentra por debajo de la nube toma una carga positiva, porque arriba hay una carga opuesta que la atrae hasta donde la materia lo permita (la superficie, o lo más alto que se encuentre en contacto con la superficie, ya sea un árbol, un edificio o la peluca de Roy Sullivan).

Cuando el campo eléctrico que así se genera es lo suficientemente fuerte, comienza a ionizar el aire que se encuentra en la base de la nube y produce una corriente conductora o rayo líder que desciende, ionizando el aire aún más. Al poseer carga, los iones son muy buenos conductores de la corriente, por lo que, una vez que la corriente conductora se acerque lo suficiente a la superficie, comienza el típico proceso que observamos cuando cae un rayo. Allí se da otro fenómeno importante, la llamada corriente de retorno, que suele ser una fulguración muy intensa, una corriente de iones positivos que viaja desde la superficie hasta la nube con una velocidad aproximada de 435 000 kilómetros

por hora y puede calentar el aire que lo rodea hasta 28 000 grados centígrados. Ese calor lo transforma en plasma, un estado muy particular de la materia que podríamos describir como un gas compuesto por iones a elevada temperatura. A fin de cuentas, un rayo con todas las de la ley.<sup>52</sup>

Como los rayos surgen de la diferencia de voltaje entre cargas de distinto signo, dentro de las nubes también suelen producirse descargas de rayos que no tocan la superficie. Son esos rayos de los que percibimos el resplandor y el trueno, pero no la descarga, es decir, relámpagos, que pueden producirse entre dos nubes separadas (rayo internube) o, dentro de una nube, entre zonas con cargas diferentes (rayos intranube).

Un dato interesante es que casi el 5% de los rayos que descargan en tierra son positivos,<sup>53</sup> esto es, descargan desde la parte superior de la nube. Estos rayos tienen la particularidad de llevar una corriente que es entre seis y diez veces más intensa que la de los negativos. Descubiertos en la década de 1970, los rayos positivos parecen haber sido la causa de varios de los accidentes de aviación a lo largo de la historia, pues, si bien los aviones están contruidos con todas las medidas de seguridad para protegerse de los rayos negativos, no lo están tanto para los positivos.

Un fenómeno muy raro relacionado con las tormentas eléctricas son las centellas o rayos globulares. Consisten en pequeñas bolas luminosas que se mueven desde una nube hacia la tierra, aunque algunas se han mantenido estáticas durante bastante tiempo hasta que, finalmente, pueden llegar a explotar o desaparecer suavemente. A veces también se ha percibido que emiten un silbido característico.

52 El tema se trata con mayor detalle en el libro *La física en la vida cotidiana*, de Alberto Rojo, de esta misma colección.

53 "The Positive and Negative Side of Lightning", *National Weather Services*, 2007, disponible en <[www.srh.noaa.gov/jetstream/lightning/positive.htm](http://www.srh.noaa.gov/jetstream/lightning/positive.htm)> [visitado en enero de 2012].

Como es poco común, aún no se sabe del todo cuál es la dinámica de su formación, aunque las principales teorías actuales apuntan a la formación de pequeñas bolas de plasma o de sustancias químicas que emiten luz (fenómeno conocido como quimioluminiscencia).

El fuerte campo eléctrico que producen las tormentas eléctricas produce plasma y también puede ionizar la superficie de estructuras puntiagudas, como los mástiles o las chimeneas, lo que provoca una pequeña descarga que tiene forma de corona y un resplandor azulado, el llamado fuego de San Telmo, que incluso se ha dado en la punta de los cuernos del ganado vacuno.

### **Duendes, elfos, trolls, gnomos... y tigres**

El desarrollo de los viajes espaciales y de la tecnología fotográfica y videográfica condujo al descubrimiento de otros fenómenos asociados a las tormentas eléctricas que normalmente no podían observarse desde la superficie. Pues, precisamente, tienen lugar por encima de las nubes y pueden llegar hasta la termosfera.

En la actualidad, se agrupa esta serie de efectos bajo el nombre de eventos luminosos transitorios que, como están asociados a rayos positivos, tienen una frecuencia de aparición muy baja que dificulta su observación. La explicación teórica de estos fenómenos es por demás incompleta, pero todos los estudios coinciden en que la termosfera (que, como sabemos, está muy por arriba de las nubes de tormenta) funciona como otro polo que interactúa con la zona superior de la nube, de carga positiva. Como la distancia entre ambas es superior a los 90 kilómetros, sólo pueden observarse o medirse cuando la descarga del rayo en la nube es de gran intensidad. Uno de los primeros que se detectó fueron los duendes (a veces se usa directamente el término *sprites*, en inglés). Son de color rojizo y ocurren por encima de la nube al mismo tiempo que se dan las descargas de rayos positivos. Poseen una forma similar a la de una medusa, es decir, tienen

una parte superior voluminosa y una estructura de filamentos, en la parte inferior, y su ancho abarca decenas de kilómetros. Lo curioso de los duendes es que no surgen de la parte superior de la nube, sino que se inician a 50 kilómetros de altura, casi al comienzo de la mesosfera, crecen hacia arriba hasta alcanzar los 90 kilómetros de altitud, donde ingresan en la termosfera, mientras que sus ramificaciones, hacia abajo, parecen producir algún tipo de descarga sobre la nube (imagen 16).<sup>54</sup>



**Imagen 16:** Duendes en el Lago Balaton, Hungría.

Si bien estos eventos se han venido registrando desde 1886, y fueron postulados de manera teórica por el científico Charles Wilson en 1925, su existencia recién fue confirmada científicamente en 1989 mediante unas pruebas realizadas con una cámara de video de baja intensidad. Otro factor que dificulta su obser-

54 Van der Velde, O. A. y otros, "Observations of the Relationship between Sprite Morphology and in-Cloud Lightning Processes", *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, D15203, 2006, pp. 1-8.

vacación a simple vista, además de la distancia, es su duración, de apenas unos milisegundos.

Los estudios con cámaras fotográficas de gran resolución señalan que se trata de esferas de ionización, originadas por una descarga eléctrica de un rayo positivo que posee un voltaje superior al promedio de los rayos. Se estima que, de cada veinte rayos positivos, únicamente uno tiene energía suficiente como para generar un duende. Otra característica de los duendes es que poseen una especie de trueno bastante particular, pues sólo es perceptible en la frecuencia de los infrasonidos,<sup>55</sup> hecho que permite su detección por otros medios no fotográficos.<sup>56</sup>

Pero la cosa no termina ahí: a algunos duendes los precede (si es que algo que sucede un mero milisegundo antes puede considerarse efectivamente anterior) la formación de un enorme anillo de luz que crece en forma radial y desciende desde los 85 kilómetros hasta unos 70 kilómetros de altitud,<sup>57</sup> los llamados halos de duende que, se cree, podrían ser la etapa inicial de la formación de los duendes. Al igual que con los duendes, su rara aparición y su escasa duración de un milisegundo vuelven mucho más difícil su estudio.

Hay un efecto luminoso transitorio que, si bien posee una forma similar a la de los halos de duende —es decir, es un anillo luminoso que crece—, suele darse a una altura mucho mayor, cercana a los 100 kilómetros, y en la mayoría de los casos estudiados, no está acompañado por un duende. A estos discos de luz que pueden abarcar hasta 530 kilómetros de diámetro, por tener

55 Los infrasonidos son ondas sonoras de frecuencia muy baja, inaudibles para el oído humano.

56 Farges, T. y otros, "Identification of Infrasound produced by Sprites during the Sprite 2003 Campaign", *Geophysical Research Letters*, vol. 32, L01813, 2005, pp. 1-4.

57 Miyasato, R. y otros, "Statistical Characteristics of Sprite Halo Events using Coincident Photometric and Imaging Data", *Geophysical Research Letters*, vol. 29, 2002, pp. 2033-2037.

un efecto tan fantástico como el de los duendes se los denomina elfos, traducción del término inglés *elves*, que es un acrónimo de Emissions of Light and VLF from EMP Sources [emisiones de luz y fuentes de pulsos electromagnéticos de frecuencia muy baja].<sup>58</sup>

Fueron observados por primera vez en 1994 desde un transbordador espacial, poseen una luminosidad suave (habitualmente de tono verdoso) y se originan en las descargas de rayo nube-tierra de mucha energía. Un rayo muy intenso es capaz de producir un pulso electromagnético vertical que acelera los electrones en regiones de mucha altitud por encima de la nube y, como consecuencia de la ionización, al igual que las auroras, emite una luminosidad horizontal, perpendicular a la dirección de avance del pulso. Como el pulso viaja a la velocidad de la luz, las presencias del rayo, del elfo y, si aparece, del duende, parecen ser simultáneas.

Siguiendo con nuestra galería de fenómenos, encontramos a los trolls, cuyo nombre también es un acrónimo (cosa que no les quita mérito a los científicos, porque seguramente les debe haber costado bastante armarlo para que coincidiera con otro ser fantástico), en este caso de Transient Red Optical Luminous Lineament [alineamiento luminoso transitorio óptico en rojo]. Los trolls suelen aparecer junto a duendes muy intensos y tienen la forma de puntos rojos con tenues colas que se elevan tras las “patas” de los duendes, cerca de la parte superior de la nube.<sup>59</sup> Al igual que los halos, parecen formar parte de la evolución de los duendes, aunque es probable que se trate de un fenómeno luminoso que surge de la propia nube y no del duende.

Si hablamos de fenómenos que surgen propiamente de la parte superior de la nube, los más conocidos y estudiados son los chorros azules (*blue jets*, en inglés), unos extraños conos de

58 Fukunishi, H. y otros, “Elves: Lightning-induced Transient Luminous Events in the Lower Ionosphere”, *Geophysical Research Letters*, vol. 23, 1996, pp. 2157-2160.

59 Pasko, V. P. y otros, “Mesosphere-troposphere coupling due to Sprites”, *Geophysical Research Letters*, vol. 28, 2001, pp. 3821-3824.

luz azul que muy raras veces surgen de los topes nubosos de las tormentas y pueden ser causados tanto por rayos positivos como negativos.<sup>60</sup> Su velocidad alcanza los 120 kilómetros por segundo y han llegado a remontarse hasta los 45 kilómetros de altitud (imagen 17). El color azulado de los chorros se atribuye a la ionización del nitrógeno de la atmósfera circundante. Su estudio es mucho más complicado que el de los duendes y otros fenómenos mesosféricos porque se originan en la nube misma. Entre estos chorros azules, los más pequeños, es decir, aquellos que sólo alcanzan hasta 25 kilómetros de altitud, se denominan iniciadores azules (*blue starters*, en inglés).



**Imagen 17:** Un chorro azul sobre una tormenta en la isla La Reunión.

60 Heavner, M. J. y otros, "Sprites, Blue Jets, and Elves: Optical Evidence of Energy Transport across the Stratopause", en D. Siskind (comp.), *Atmospheric Science Across the Stratopause*, Washington, American Geophysical Union, 2000.

Los chorros gigantes, por su parte, conforman una suerte de híbrido entre un chorro azul y un duende, pues se originan en la nube, como los chorros azules, pero la forma de su parte superior es similar a la de los duendes. Duran más que el resto (de 200 a 400 milisegundos) y se expanden hasta unos 90 kilómetros, de manera que recorren prácticamente cuatro de las cinco capas de la atmósfera (imagen 18).<sup>61</sup>



**Imagen 18:** Un chorro gigante sobre una tormenta en la isla La Reunión.

En la cima de las nubes también se dan otros eventos, como los gnomos, unas puntas de luz blanquecina de aproximadamente 150 metros de ancho que avanzan hacia arriba cerca de un kilómetro, o los pixies, que son una serie de puntos blancos que se

61 Soula, S. y otros, "Gigantic Jets produced by an Isolated Tropical Thunderstorm near Reunion Island", *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, D19103, 2011, p. 114.

desplazan unos 100 metros, que, al parecer, no están relacionados con la descarga de un rayo.<sup>62</sup>

En algunos casos, al interactuar con las capas superiores de la atmósfera, las descargas de rayos también provocan otros eventos no luminosos, como las emisiones instantáneas de rayos gamma asociadas a la generación de positrones (es decir, de partículas de antimateria).<sup>63</sup> Además, en la termosfera, los satélites han detectado la emisión de pulsos de muy alta frecuencia asociados a descargas en tormentas eléctricas, denominados TIPPS (Trans-ionospheric Pulse Pairs [pares de pulsos transionosféricos])<sup>64</sup> y también se ha planteado la posibilidad de que las tormentas eléctricas induzcan la emisión de rayos X.<sup>65</sup>

Como vemos, los fenómenos eléctricos asociados a las tormentas que tienen lugar en las capas superiores de la atmósfera constituyen un campo de estudio bastante fértil en el que continuamente se descubren nuevas formas, tan fugaces como extrañas, que tardan años en explicarse. Durante la última misión del transbordador Columbia se registró lo que parece ser un nuevo tipo de descarga inusual que los expertos bautizaron tigre (del inglés, *tiger*, obviamente un acrónimo, de Transient Ionospheric Glow Emission in Red [emisión ionosférica transitoria incandescente en rojo]).<sup>66</sup> (¡Vaya uno a saber cuántos acrónimos originales quedan aún por crear en este campo!)

62 Lyons, W. A. y otros, "Upward Electrical Discharges from Thunderstorm Tops", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 84, 2003, pp. 445-454.

63 Cowen, R., "Signature of Antimatter detected in Lightning", *Science News*, vol. 176, 2009, p. 9.

64 Zuelsdorf, R. S. y otros, "Trans-ionospheric Pulse Pairs (TIPPs): Their Geographic Distributions and Seasonal Variations", *Geophysical Research Letters*, vol. 24, 1997, pp. 3165-3168.

65 Chubenko, A. P. y otros, "Intensive X-ray Emission Bursts during Thunderstorms", *Physics Letters A*, vol. 275, 2000, pp. 90-100.

66 Yair, Y. y otros, "Space Shuttle Observation of an Unusual Transient Atmospheric Emission", *Geophysical Research Letters*, vol. 32,

## El faro de la mitad del mundo

El lugar donde más frecuentemente se produce la descarga de rayos a tierra es la aldea de Kifuka, en la República del Congo, que tiene una tasa anual de 158 descargas por kilómetro cuadrado.<sup>67</sup> Existe además una región muy particular en la que, si bien las descargas son mínimas, se observan relámpagos durante unos 160 días al año. Esta zona tormentosa donde los relámpagos parecen eternos, el faro de Maracaibo o relámpago del Catatumbo, está situada al sur del lago Maracaibo, en Venezuela. Allí se da uno de los fenómenos meteorológicos más extraños e intrigantes del planeta: un gigantesco espectáculo eléctrico visible a 400 kilómetros de distancia que, desde hace siglos, ha sido utilizado como faro por los navegantes del Pacífico. El poeta y dramaturgo español Lope de Vega lo menciona en su poema épico *La dragontea* (1597) y el naturalista alemán Alexander von Humboldt, en 1799, lo describe en estos términos: “explosiones eléctricas que son como fulgores fosforescentes”.<sup>68</sup>

El faro está ubicado en dos extensas regiones pantanosas bien localizadas, cercanas al río Catatumbo, donde hay muchas descargas entre nubes y rara vez caen a tierra. Esto provoca que, durante toda la noche, haya un continuo resplandor fosforescente en el cielo cuyos truenos prácticamente no se escuchan desde la superficie.

Los científicos han elaborado diversas hipótesis para tratar de explicarlo, como la presencia de metales radiactivos en la zona y otras por el estilo. Según las últimas investigaciones, su causa parece ser el ascenso hacia las nubes del metano que liberan las trescientas mil hectáreas de pantanos del lugar. La elevada con-

---

L02801, 2005, pp. 1-4.

67 Earth System Research Laboratory, ob. cit.

68 Citado en Falcón, N., “Sobre el origen y recurrencia del relámpago del río Catatumbo”, *Faraute de Ciencias y Tecnología*, vol. 1, 2006, pp. 40-49.

centración de metano favorece, por un lado, que en las nubes se separen las cargas eléctricas, fomentando las descargas intranubes que ya vimos, y, además, la fosforescencia que describen científicos, marinos y poetas.<sup>69</sup> A esto se agrega que, como hay un centro local de baja presión entre los ríos Bravo y Catatumbo, los vientos no logran disipar el metano que queda atrapado en las nubes, que abunda sobre todo en verano. En este sentido, el hecho de que durante y después de que se registren precipitaciones intensas y/o prolongadas la actividad disminuya, o incluso desaparezca, podría deberse a que las precipitaciones arrastran el metano hacia la superficie.

Como vemos, este sistema meteorológico es único en el mundo y se estima que podría llegar a ser una importante fuente regeneradora del ozono estratosférico,<sup>70</sup> cuya parte más importante, como vimos en el capítulo anterior, se forma gracias a los rayos UV.

El calentamiento desigual de las distintas zonas de nuestro planeta da lugar a todo tipo de fenómenos meteorológicos, desde espectáculos vistosos hasta grandes catástrofes. La atmósfera, junto con los océanos que le aportan agua, no son precisamente una simple capita tranquila sino que conforman un sistema complejo en el que se reparte una y otra vez la energía que la Tierra recibe del Sol. Es hora de analizar, entonces, cuál es el papel de los seres vivos en todo esto...

69 *Ibíd.*

70 Falcón, N., "El perpetuo relámpago de Catatumbo", *Revista Creando*, vol. VII-VIII, 2008-2009, pp. 9-10.

# Índice

<b>Sobre el Concurso Ciencia que ladra-La Nación</b>	<b>9</b>
<b>Este libro (y esta colección)</b>	<b>11</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>17</b>
<b>Acerca del autor</b>	<b>18</b>
<b>Prólogo</b>	<b>19</b>
<b>1. Polvo, piedras y orígenes: la atmósfera propia y la ajena</b>	<b>21</b>
El inglés de la manzana y la mecánica del universo, 21. Creando un poco de atmósfera, 24. Se va la primera..., 26. Las segundas partes nunca fueron buenas, 28. La tercera es la vencida, 31. Una inmensa bola de nieve, 33. La capa protectora, 34. El mayor cataclismo de la historia, 36. <i>Jurassic Bang!</i> , 37. Mamíferos <i>on ice</i> , 39. El futuro llegó hace rato, 40	
<b>2. Atmósfera, sin ti me falta el aire</b>	<b>43</b>
Sube, sube, sube y baja, 43. Vientos de cambio, 44. Pantalla solar, 46. La del medio siempre es la más tranquila, 48. ¡Qué calor!: 1500 grados es fiebre, 50. El espacio... la frontera final, 53. Un peso sobre	

los hombros, 54. Sin ti me falta el aire, 56. Cumbres borrascosas, 56. Todo lo que sube, ¿tiene que bajar?, 57. *Volare, oh oh!*, 58. Donde ni las águilas se atreven, 60. El sonido del trueno, 62. Azul un ala, del color del cielo, 65. A brillar, mi amor, 67

### 3. La atmósfera en acción

71

Vivaldi y el ecuador, 71. Viento, dile a la lluvia, 72. Lo que mata es la humedad, 73. Aquella solitaria vaca, 74. Había una vez unas nubes, 76. Sube a mi fábrica de nubes, 80. Un tornado arrasó a mi ciudad, 83. Lo que el viento se llevó, 86. Cosecharás tu siembra, 88. Sobre llovido, mojado, 90. ¡Rayas y centollas!... digo, ¡rayos y centellas!, 94. Duendes, elfos, trolls, gnomos... y tigres, 97. El faro de la mitad del mundo, 104

### 4. Como el aire que respiras

107

*Aire fijo*, una obra en cinco actos, 107. Buenas vibraciones, 110. Pasen a ver el ciclo, 112. Un gas como cualquier otro, 114. Feliz, feliz en tu día, 115. ¡Explota, explota, me explotó!, 116. Cada vez que respiras, 119. Dame fuego, dame dame fuego, 122. No detenga su motor, 124. Gaia, oh oh, Gaia, 126

### 5. El hombre versus la atmósfera

129

¿Aire puro o pura espuma?, 129. Lucy en el cielo con freones, 130. Suenan las otras campanas, 134. ¡Con esas curvas y yo sin frenos!, 137. Febo asoma, 140. Hizo falta tanto hielo para diluir tanta agua, 142. Dióxido de carbono rima con ozono, 144. La Liga de la Justicia, 145. El satánico doctor NO<sub>x</sub>, 147. ¿Has visto alguna vez la lluvia?, 151. El gran escape, 152. En un auto feo, 154. ¿Hacia un mundo sustentable?, 157

<b>Epílogo</b>	<b>163</b>
<b>Bibliografía comentada</b>	<b>165</b>
<b>Fuentes de las imágenes</b>	<b>167</b>