

M. Delaunay cita en su *Curso de mecánica* un fenómeno bastante curioso que se explica fácilmente por el principio de Arquímedes.

“Cuando se introduce una uva en una copa llena de Champagne, dice, esta uva cae inmediatamente al fondo de la copa. Pero el ácido carbónico que se desprende continuamente del vino, se acumula en breve en forma de burbujillas alrededor del grano. Formando cuerpo estas burbujas de gas con la uva, aumentan su volumen sin que su peso crezca de un modo notable; el empuje del líquido, que al principio era menor que el peso del grano, no tarda en sobreponerse á éste, y el grano sube hasta la superficie del Champagne. Si se da entonces una ligera sacudida á la uva para desprender las burbujas de ácido carbónico que se habían adherido á su superficie, baja de nuevo al

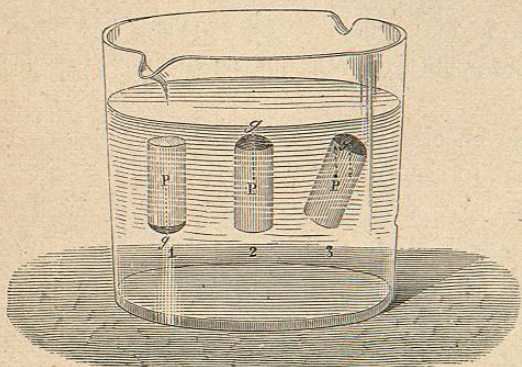


Fig. 58.—Equilibrio de un cuerpo sumergido en un líquido de la misma densidad que la suya

fondo de la copa; y al cabo de algún tiempo, vuelve á subir otra vez. De este modo puede continuarse el experimento, mientras siga desprendiéndose ácido carbónico.”

Si el cuerpo sumergido no es homogéneo; si, por ejemplo, es un compuesto de corcho y plomo, cuyo peso total sea el del agua desalojada (figura 58), sin que los dos cuerpos tengan el mismo centro de gravedad, el centro de gravedad g del conjunto y el centro de presión P no coinciden ya.

Para que haya equilibrio es menester que ambos puntos estén en una misma vertical, como en las posiciones 1 y 2; y por otra parte, el equilibrio sería inestable si el centro de gravedad estuviese en la parte superior. Como la posición 3 no reúne esta condición, tampoco habrá equilibrio hasta que el cuerpo, después de algunas oscilaciones, haya tomado la posición 1.

Cuando un cuerpo desaloja un volumen de líquido cuyo peso es superior al suyo—lo cual puede consistir en la diferencia de densidades ó en la forma del cuerpo,—flota á la superficie.

En este caso, el agua desalojada por la parte sumergida equivale, en cuanto á su peso, al del cuerpo juntamente con el de la carga que soporta; así, por ejemplo, el casco de un buque, y su cargamento en hombres, material y mercancías, pesan reunidos precisamente lo mismo que el volumen de agua de mar desalojado debajo de la línea de flotación. Por otra parte, la segunda condición de equilibrio es también la misma, esto es, que el centro de gravedad del cuerpo y el de presión deben estar en una misma vertical. Mas por lo que hace á la estabilidad, no es indispensable ya que el primer punto esté debajo del otro. Además, según la posición del cuerpo flotante y su forma, la del volumen desalojado cambia á su vez, variando también el centro de presión, de suerte que las condiciones de equilibrio varían naturalmente á cada momento.

Jamás existe en los buques un equilibrio perfecto, rigurosamente hablando, ni aun cuando el mar está terso y tranquilo. Siempre hay en ellos oscilaciones de mayor ó menor amplitud, por lo cual claramente se comprende que lo esencial es que, en las circunstancias más desfavorables, los movimientos del barco no sean tan bruscos que lo hagan zozobrar.

En los mares inmediatos á los polos se encuentran con frecuencia grandes masas de

hielo, conocidas de los marinos que navegan por aquellas regiones con el nombre de *icebergs* (montes de hielo). Por lo general son enormes fragmentos desprendidos de los espacios de mar helados, ó que se han deslizado al mar desde los glaciares del polo.

No es raro encontrar algunas de estas masas flotantes que se elevan, ora presentando formas regulares (fig. 59), ora cual fantásticas arcadas, á alturas que varían entre 30 y 60 metros sobre el nivel del mar. Ahora bien, partiendo de la ley de equilibrio de los cuerpos flotantes, y considerando que la densidad del hielo no excede

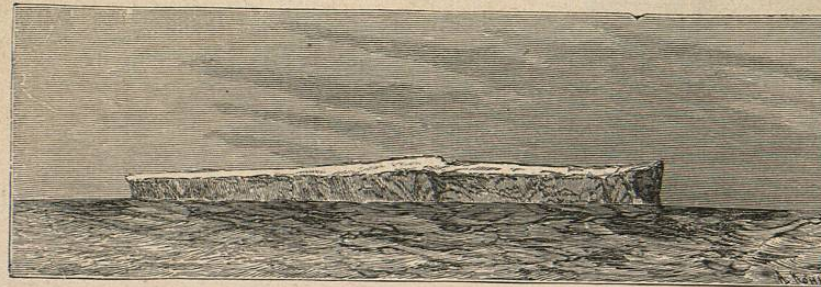


Fig. 59.—Icebergs de las regiones australes

de 0,918, al paso que la del agua de mar es de 1,026, debe deducirse que la parte sumergida del iceberg tiene un volumen siete ú ocho veces igual al de la masa emergida, y por consiguiente un témpano de forma regular, de 30 á 60 metros de altura, tendrá un espesor total de 250 á 500 metros.

CAPÍTULO VII

GRAVEDAD DEL AIRE Y DE LOS GASES

I

EL AIRE Y LOS DEMÁS GASES SON PESADOS, ELÁSTICOS Y COMPRESIBLES

Vivimos en el fondo de un océano fluido, cuya profundidad media es por lo menos cien veces mayor que la de los mares, y que envuelve por todas partes al esferoide terrestre. La substancia de que está formado este mar es el aire, mezcla de varias substancias gaseosas, siendo las dos principales el oxígeno y el nitrógeno; también contiene ácido carbónico, vapor de agua y á veces amoníaco, mas en proporciones variables, al paso que los dos primeros gases se encuentran en la misma relación en todas partes. Esta relación es, poco más ó menos, en un volumen igual á 100, de 21 de oxígeno y 79 de nitrógeno.

Nadie ignora que el aire es el alimento indispensable de la respiración de los animales; y hasta los que viven en el agua no pueden pasar sin él; otro tanto debemos decir respecto de los vegetales que, bajo la influencia de la luz, descomponen el ácido carbónico del aire, absorben el carbono y restituyen el oxígeno, tan necesario para la respiración animal.

No es posible ver el aire, á lo menos en un espacio de reducida extensión, á causa de su gran transparencia; pero á largas distancias, la interposición de las capas gaseosas

es muy perceptible y comunica á los cuerpos remotos, á las montañas que limitan el horizonte, una tinta azulada, más brillante y más pura en el color del cielo, cuando ninguna nube empaña la atmósfera. Sin el color azul de ésta, el cielo sería incoloro, es decir, enteramente negro, y las estrellas brillarían en él en mitad del día. Por la noche, como la cubierta aérea no está ya iluminada por los rayos del sol, sino tan sólo por los tenues resplandores de la luna ó de las estrellas, parece de color azul oscuro; y si de día ascendemos á una altísima montaña, observamos el mismo fenómeno, porque, siendo menos espesas y menos densas las capas de aire que gravitan sobre ella, no absorben sino una escasa porción de los rayos azules de la luz solar.

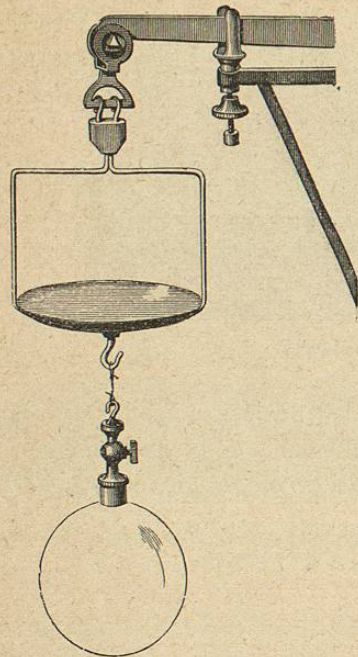


Fig. 60.—Demostración práctica del peso del aire y de los gases

Otros fenómenos, que percibimos merced al sentido del oído y al del tacto, nos revelan además la existencia del aire. Cuando éste se halla en reposo, bástanos ponernos en movimiento para sentir su presencia. Su masa resiste á la dislocación que la imprimimos, resistencia que advertimos en nuestras manos y rostro. Pero todavía se echa mucho más de ver la materialidad del aire en los movimientos de que él á su vez está dotado; desde las brisas más leves hasta los impetuosos vientos de los huracanes y de las tempestades, todas las agitaciones atmosféricas son pruebas continuas de su existencia.

Por último, gracias á las vibraciones comunicadas al aire por los cuerpos sonoros, se propaga el sonido hasta nuestros oídos, y aun él mismo, cuando se le pone en vibración en condiciones á propósito, se convierte en productor del sonido, como lo veremos en la

segunda parte de este tomo. Hase sacado partido de la mayor parte de las propiedades del aire; en otro lugar describiremos muchas de sus numerosas é interesantísimas aplicaciones.

El objeto principal de este capítulo será el estudio de las propiedades del aire considerado como cuerpo pesado, así como también el de los fenómenos dimanados del peso ó gravedad del aire ó de las demás substancias gaseosas; porque *el aire es pesado*, como fácilmente se comprenderá mediante un sencillo experimento.

En breve describiremos el aparato que sirve para extraer de una vasija ó recipiente el aire que contiene, para *hacer el vacío*, como dicen los físicos. Este aparato es el que se conoce con el nombre de *máquina neumática*. Por ahora diremos que si se toma un globo de cristal provisto de un cuello metálico con una llave, y se le pesa después de haber hecho en él el vacío (fig. 60), basta abrir la llave y dejar que el aire penetre para que el fiel de la balanza se incline hacia el lado del globo. Para restablecer el equilibrio roto, hay que añadir pesas marcadas, es decir 1^{er},29 próximamente por cada litro de que se compone la capacidad del globo.

He aquí, pues, directamente demostrado el peso del aire.

El mismo experimento, hecho con otros gases, demostraría del propio modo que los cuerpos en estado gaseoso están sometidos, como los líquidos y los sólidos, á la acción de la gravedad. Galileo fué el primero que demostró la importante verdad de que el

aire es pesado (1); pero Otto de Guericke, inventor de la máquina neumática, ideó el experimento que acabamos de indicar.

Si el aire contenido en una vasija es pesado; si se puede valuar su peso por medio de la balanza, el inmenso volumen de aire que descansa en el suelo debe comprimirlo en proporción de la masa atmosférica, y esta presión, que sin duda es enorme, no puede manifestarse sino con fenómenos perceptibles. Así sucede en efecto; mas, antes de estudiar estos fenómenos, digamos unas cuantas palabras sobre las propiedades de los gases, tanto de las que disfrutan en común con los líquidos, como de las que los caracterizan de un modo especial.

Los gases, lo mismo que los líquidos, están formados de partes, de moléculas dotadas de extraordinaria movilidad; así es que las masas gaseosas ceden al menor esfuerzo,

se dividen permitiendo que los cuerpos sólidos ó líquidos efectúen en su seno toda clase de movimientos, sin oponerles una marcada resistencia como la velocidad y dislocación de sus moléculas no sean muy grandes, ó como la masa del cuerpo que se mueva no sea escasa con relación á la del gas desalojado.

Los gases son eminentemente elásticos y expansibles. Valgámonos para demostrarlo de una vejiga aplastada y comprimida, que por consiguiente no contendrá más que un volumen de aire muy reducido si se le compara con la capacidad que tendría la misma vejiga inflamada (fig. 61). En tal estado, el aire

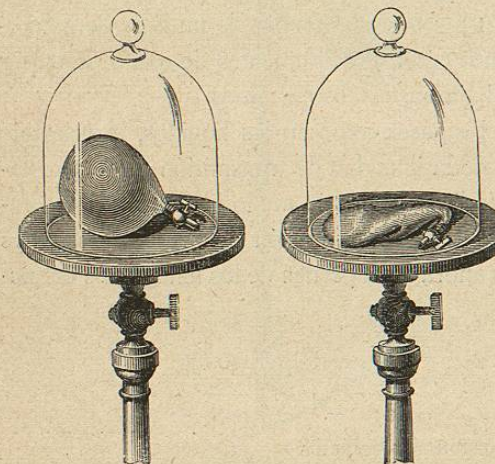


Fig. 61.—Expansibilidad y compresibilidad de los gases

interior no aumenta de volumen, porque la fuerza elástica de que están dotadas sus moléculas, y que vamos á hacer ostensible, está equilibrada por la presión del aire exterior. Pongamos ahora esta vejiga bajo la campana de la máquina neumática. Conforme se va haciendo el vacío, la vejiga aumenta de volumen, se infla y hasta llega á romperse á causa de la presión interior que dilata sus paredes. Si se da entrada al aire en dicha campana, recobra aquélla prontamente su volumen primitivo, lo cual prueba que el aire es *elástico y compresible* á la vez. Lo mismo sucedería con cualquier otro gas.

Con el *eslabón neumático* se comprueban también ambas propiedades. Introduciendo un émbolo bien calibrado y engrasado en un tubo de cristal lleno de aire (figura 62), se experimenta una resistencia débil, pero creciente, y se ve que el volumen del aire disminuye en una mitad, en dos tercios, etc., primera operación que prueba la gran compresibilidad del gas. Si al llegar el émbolo á la parte inferior de su curso se le abandona á sí mismo, vuelve á subir espontáneamente, prueba no menos cierta de la elasticidad del aire. Como esta compresión desarrolla calor, se hace uso de este instrumento para encender un pedazo de yesca puesto debajo del émbolo, sólo que la com-

(1) Los antiguos presumieron la gravedad del aire, pero no pudieron comprobarla prácticamente. Aristóteles dice en su tratado de *Calo*: "Cuando todos los cuerpos están en su lugar propio, son pesados todos excepto el fuego. *Hasta el aire mismo es pesado*. La prueba está en que un odre lleno de aire pesa más que uno vacío....." Por desgracia, era imposible realizar esta prueba, toda vez que un odre, lleno ó vacío, pesado en el aire no podía indicar más que el peso de su cubierta.

presión ha de ser en este caso algo brusca. De aquí procede el nombre de *eslabón neumático* que se ha dado á este pequeño instrumento.

Así pues, los gases son elásticos y compresibles como los líquidos, mas al paso que esta última propiedad es muy reducida en los segundos, los primeros la tienen en alto grado. Notemos además que si la cohesión de las moléculas líquidas es casi nula, en los gases esta cohesión no existe; al contrario, sus moléculas tienen propensión á repelerse, neutralizándola solamente una presión exterior. De aquí resulta que, si llega á disminuir esta presión, el volumen de gas aumenta; pero en los líquidos el volumen es constante, á lo menos mientras el cuerpo conserva el mismo estado.

Finalmente, lo que distingue también á los líquidos de los gases es la escasísima densidad comparativa de estos últimos, pues mientras que un litro de líquido pesa 13,596 gramos (peso de un litro de mercurio) y no baja de 715 gramos (éter), el de un litro de gas ó de vapor no excede de 20 gramos y baja hasta 9 centigramos.

Por lo demás, tanto en los gases como en los líquidos, el principio de igualdad de presión y el de la igualdad de transmisión de las presiones en todos sentidos, los indica del propio modo la teoría y los comprueba la práctica; en breve tendremos ocasión de presentar algunos ejemplos de ello. Volvamos ahora á ocuparnos de los fenómenos ocasionados por la gravedad.



Fig. 62.—Eslabón neumático

II

PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Hemos visto que Galileo fué el primero que demostró esta gravedad, siendo muy conocida la historia de tan importante descubrimiento. En 1640, los fontaneros de Florencia encargados de construir una bomba en el palacio del gran duque se quedaron sorprendidos al ver que, no obstante las buenas condiciones del aparato, el agua no quiso elevarse hasta el extremo superior de la bomba, es decir, á más de 32 pies (unos 10^m,3). Los ingenieros y académicos florentinos consultados acerca de semejante anomalía no supieron á qué atribuirlo, y entonces se recurrió á Galileo, que á la sazón tenía setenta y seis años, y cuya inmensa reputación de saber no había sufrido menoscabo á consecuencia de las persecuciones. Galileo dió primeramente una respuesta evasiva, pero el problema planteado le hizo reflexionar; presumió que la presión del aire era la causa que hace subir el agua hasta dicha altura, y que el *horror de la Naturaleza al vacío* era una explicación vana y ociosa, por cuanto hubiera sido preciso suponer que no manifestaba este horror más allá de una altura determinada. Empezó, pues, por comprobar la gravedad del aire, pesando una botella en la que hizo el vacío por medio del vapor procedente de la ebullición de cierta cantidad de agua, y luego dejó que su discípulo Torricelli llevara más adelante la comprobación de sus conjeturas.

Un año después de la muerte de Galileo, ocurriósele á Torricelli examinar qué resultaría introduciendo en un espacio vacío un líquido mucho más denso que el agua, el mercurio. Tomó un largo tubo cerrado por un extremo y lo llenó de dicho líquido; en

seguida, tapando con el dedo el extremo abierto del tubo para impedir que el mercurio se vertiera y el aire penetrara, introdujo dicho extremo en una vasija llena de mercurio, y abandonando entonces el líquido á sí mismo, mantuvo el tubo en posición vertical (figuras 63 y 64). Torricelli vió que el líquido descendía y que, después de oscilar un tanto, se detenía á un nivel que subsistió casi invariable á 28 pulgadas (76 centímetros) próximamente sobre el nivel del mercurio de la vasija.

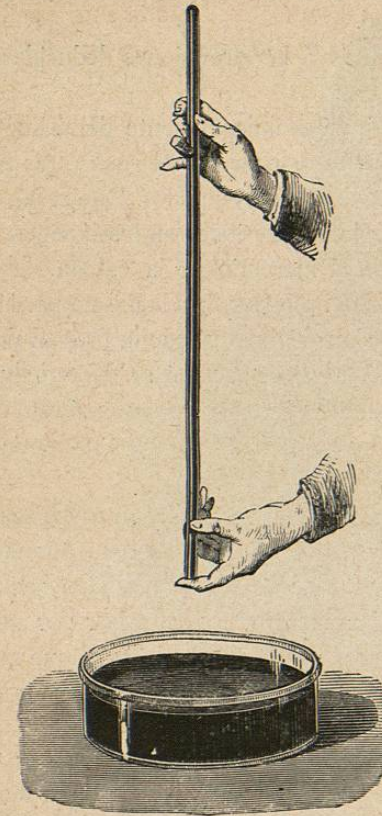


Fig. 63.—Experimento de Torricelli

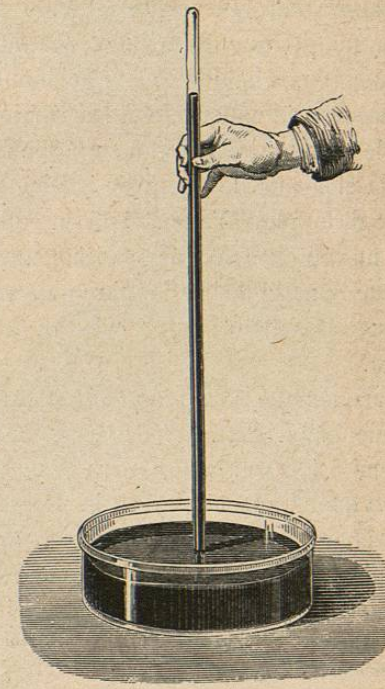


Fig. 64.—Experimento de Torricelli: efecto de la gravedad atmosférica

Si la idea de Galileo era exacta, y la presión atmosférica la que mantenía en efecto la columna de agua á 32 pies de altura, la misma presión debía elevar el mercurio, que es trece veces y media más pesado que el agua, á una altura igual número de veces menor. Ahora bien, 28 pulgadas son en efecto una longitud trece veces y media menor que 32 pies. Tal es, en su sencillez, este gran descubrimiento; tal es el tubo de Torricelli ó, como se le llama en nuestros días, el *barómetro*, instrumento que sirve para medir la presión de la atmósfera.

Gran trabajo le costó á Torricelli el vencer la resistencia que opusieron los sabios de su época á sus explicaciones sobre la elevación del agua y del mercurio (1). Pero los

(1) "La Naturaleza huye del vacío, no puede sufrir el vacío, tiene horror al vacío. *Fuga vacui; non datur vacuum in rerum Natura.*" Tales eran las fórmulas mediante las cuales se creía explicar suficientemente, antes de la época de Pascal, el movimiento ascendente del agua en las bombas, la introducción del aire en un fuelle, la del mismo en los pulmones, y otros muchos fenómenos cuya causa mecánica es la presión del aire. Dícese que Descartes atribuía, desde 1638, al peso del aire la subida del agua en las bombas.

nuevos experimentos ideados por Pascal no dejaron ya lugar á duda alguna. Calculó que si el peso del aire era en realidad la causa de los fenómenos observados, la presión debería ser menor á medida que fuese mayor la altura de la atmósfera, ó bien menor la columna gaseosa sobrepuesta al nivel exterior del líquido. Por consiguiente la altura del mercurio en el tubo de Torricelli debería ser menor en la cumbre de una montaña que en el llano. Este fué el origen de los célebres experimentos que encargó á su cuñado Perier ejecutara en el Puy de Dôme, y de los que él á su vez hizo al pie y en la cúspide de la torre de Saint-Jacques la Boucherie.

Los resultados fueron de todo punto conformes á las previsiones deducidas de la nueva teoría (1).

La altura del mercurio en el tubo de Torricelli es independiente del diámetro de éste, con tal que este diámetro no sea muy pequeño; porque en tal caso otras fuerzas que estudiaremos influyen sobre manera en los niveles de los líquidos. Este resultado es una consecuencia natural de la transmisión igual de las presiones en los líquidos; la columna de mercurio actúa con su peso sobre todo el mercurio de la cubeta, de suerte que cada elemento de superficie igual á la sección del tubo soporta la misma presión por parte de dicho peso. Y como está en equilibrio, síguese de aquí que la presión del aire en este mismo elemento es precisamente igual á la primera. ¿Qué se debe deducir de esto? Que la masa de la atmósfera pesa sobre la superficie del suelo como si esta superficie estuviese en todas partes cubierta de una capa de mercurio de unos 76 centímetros de altura.

Añadamos que, como la presión del aire se transmite por igual y en todos sentidos, el peso de la atmósfera se hace sentir donde quiera que el aire penetre y permanezca en comunicación con la atmósfera misma, en el interior de las casas, de las cavidades, lo mismo que al aire libre y en la periferia de los cuerpos. Esto explica por qué los cuerpos situados en la Tierra no quedan aplastados por tan enorme presión, que no baja por término medio de 10,333 kilogramos por cada superficie de un metro cuadrado.

Lo cierto es que el P. Mersenne dió noticia á Pascal del experimento de Torricelli, que data de 1643 y que se conoció en Francia al año siguiente. El P. Mersenne había tratado de reproducirlo sin lograrlo, pero durante un viaje que hizo á Roma tuvo ocasión de conocer exactamente sus condiciones. Pascal, no bien las supo, repitió muchas veces los experimentos de Italia é hizo otros varios que le revelaron la verdadera causa del fenómeno, esto es, la gravedad del aire. Valióse al efecto de diferentes líquidos de distintas densidades, como aceite, agua y vino, y vió que las alturas estaban en razón inversa de las densidades. Por último, concibió y ejecutó ó hizo ejecutar los famosos experimentos que prueban que la presión del aire disminuye á medida que uno se eleva en la atmósfera. Después de explicar el experimento llevado á cabo en el Puy de Dôme, Pascal se expresa en estos términos contra las tradiciones inveteradas de la rutina escolástica: "Querido lector, la aquiescencia universal de los pueblos y la muchedumbre de filósofos contribuyeron á que se arraigase el principio de que antes sufriría la Naturaleza su destrucción propia que el menor espacio vacío. No han faltado hombres de superior talento que se resistieran á llevar la cuestión á tal extremo, pues si bien han creído que la Naturaleza tiene horror al vacío, han supuesto sin embargo que esta repugnancia tenía sus límites y que podía ser vencida por alguna violencia; pero nadie hasta ahora se ha atrevido á sostener lo siguiente: que la Naturaleza no siente repugnancia alguna al vacío, que no hace ningún esfuerzo para evitarlo, y que lo admite sin dificultad y sin resistencia."

(1) "He ideado, escribía Pascal á Perier, un experimento que podrá disipar todas las dudas, si se ejecuta con precisión. Que se haga la prueba del vacío muchas veces, en un mismo día, con el mismo azogue, al pie y en la cumbre de la montaña del Puy que está junto á nuestra ciudad de Clermont. Si, como presumo, la altura del azogue es menor arriba que abajo de la montaña, resultará que la gravedad ó presión del aire es la única causa de la suspensión del azogue y no el horror al vacío, toda vez que es indudable que hay mucho más aire que pese al pie de la montaña que no en su cima, y nadie podrá decir que la Naturaleza aborrece el vacío en un punto más que en otro."

Siendo la superficie del cuerpo humano de metro y medio cuadrado, poco más ó menos, en una persona de estatura regular y de mediana corpulencia, todos soportamos respectivamente una carga equivalente á 15,500 kilogramos.

Acabamos de dar la razón de que semejante carga no nos aplaste contra el suelo; esto es, la de que todas las presiones ejercidas sobre cada punto de nuestro cuerpo se equilibran mutuamente. Pero lo que á primera vista parece incomprendible es que no



PASCAL

nos estruje el esfuerzo de esas presiones contrarias. La razón, sin embargo, es muy obvia; todos los fluidos contenidos en nuestro organismo ejercen una reacción contra la presión de la atmósfera, y esta reacción incesante explica nuestra insensibilidad natural, y la falta de los fenómenos que podría hacernos presumir la presión del aire. Por lo demás, dicha reacción no es una simple hipótesis, como lo prueba la aplicación de ventosas, ó sea de esos vasitos de metal ó vidrio que en caso necesario nos ponemos sobre la piel; pues cuando se hace el vacío en su interior, la piel se infla, las venillas estallan, y la sangre afluye, porque la presión atmosférica no la mantiene ya contenida en los vasos capilares.

Para hacer patente la energía de la presión atmosférica, se ejecutan en las cátedras de física algunos experimentos interesantes que describiremos rápidamente.

Uno de los más antiguos es el de los hemisferios de Magdeburgo, cuyo descubrimiento se debe á Otto de Guericke.

Consiste en dos hemisferios de cobre que encajan uno en otro formando una esfera