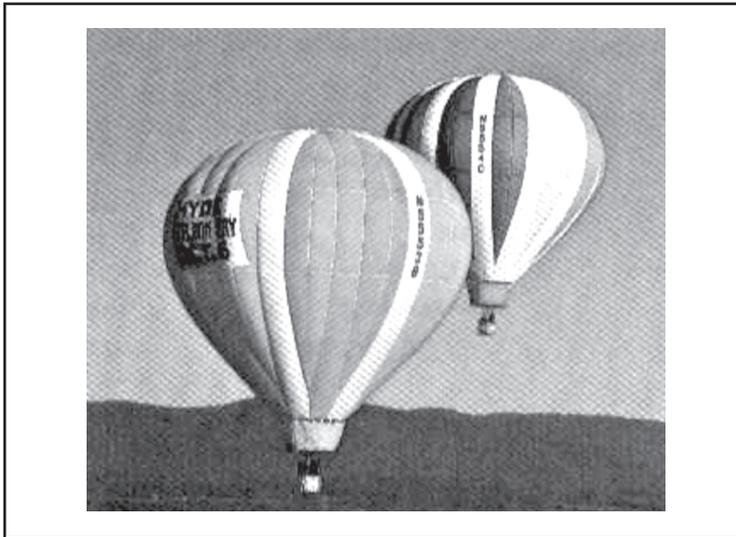


CAPÍTULO 5

SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL AIRE

Muchos sabemos de la existencia del aire porque respiramos, pero poco podemos identificar la forma como actúa y menos en condiciones de reposo. Vemos como los globos inflados con gas se elevan en el aire, cómo los aviones logran atravesar las nubes, cómo las aves planean en el aire y cómo los pulmones se inflan cada vez que inhalamos aire. Sin embargo, identificar, el comportamiento del aire ha sido objeto de estudio desde la antigüedad, pero sólo hasta la Edad Media se comprendió que era activo y que además es la causa de muchos de los fenómenos que encontramos en la vida cotidiana.



Expansión de los gases

EXPLORACIÓN DE IDEAS

1. Explique por qué el agua que hay en un pitillo no se cae, cuando éste se encuentra tapado en uno de los extremos
2. ¿Puede una persona respirar si no hay fuerza de gravedad?
3. Explique por qué un vaso lleno de agua cubierto con un papel, al invertirlo rápidamente el agua no se cae
4. Explique por qué los bebederos de las aves no se desocupan rápidamente si el líquido está bocabajo
5. ¿Por qué se hace difícil separar dos superficies completamente lisas y pulidas?

EL ESTUDIO DEL AIRE EN LA ANTIGÜEDAD

Los experimentos mencionados anteriormente sobre el vacío, eran en sí mismos ampliamente claros y suficientes como para terminar con la doctrina del horror al vacío. Sin embargo, y a pesar de todo, no lograron persuadir a los defensores del tradicionalismo. No porque hubiera errores en las demostraciones sino porque existía una ciega sumisión al pensamiento antiguo. Esta actitud del tradicionalismo de no aceptar el vacío fue motivo para que Pascal se decidiera a hacer otra serie de experimentos nuevos. Los objetivos fundamentales de estos experimentos eran: “convencer a los incrédulos y destruir definitivamente el antiguo y tenaz prejuicio y, dejar sentado que la única y verdadera causa de los fenómenos atribuidos al horror al vacío, es el peso y la presión de la masa del aire exterior”.

El aire era uno de los cuatro elementos fundamentales de la naturaleza para Aristóteles, agua, fuego y tierra eran los restantes. Los aristotélicos sostenían que el aire era un elemento pasivo, no tenía peso y sólo se mantenía en su esfera alrededor de la tierra. Ni el aire ni el agua pesan en su lugar natural, esto quiere decir que el agua no puede pesar en el agua, tampoco podría suceder que el aire pesara en el aire. Si éste no pesa, tampoco puede intervenir en los fenómenos conocidos. Su única cualidad era llenar los espacios dejados por los cuerpos antes que permitir la formación de un vacío en ese lugar.

Sin embargo, contrario a esta postura estaba Anaxímenes (600 a c) quien se formó en la escuela de tales de Mileto, llegó a considerar que el aire era “el principio inagotable” del universo, al respecto dice: “ el universo es un ser vivo, sujeto a los accidentes del nacer y del morir y que, por tanto, ha de respirar, así pues el aire es el aliento vital y el alma que penetra y conserva la vida de los cuerpos”.

Este carácter animista al aire lo coloca como elemento central de la creación y por tanto es activo y vital.

La controversia con relación al aire se mantiene hasta la Edad Media, pero ello no evitó que algunos inventores de la antigüedad como Heron de Alejandría (siglo I a.c) diseñaran aparatos y mecanismos para observar comportamientos con el aire, él mismo inventó el eolípilo (quizás la primera máquina de vapor), el molino de viento.

EL AIRE EN LA EDAD MEDIA

Las dos corrientes (tradicionalistas y no tradicionalistas) estaban por caminos opuestos. Los que defendían las concepciones plenistas mantenían la idea de que el aire es inactivo porque la causa de los fenómenos estudiados es el horror de la naturaleza al vacío, y los defensores de las concepciones vacuistas sostenían que el vacío existe y es inactivo, pero que la verdadera causa de los fenómenos estudiados es la actividad del aire. Pascal se convirtió en un gran defensor de la corriente de los no tradicionalistas y en contra de las opiniones de Descartes llegó a sostener que el aire tiene peso, ejerce acción sobre el medio que le rodea y se comporta como un líquido, incluso la crítica alcanzó niveles ideológicos en torno a los cuales Pascal “veía en el cartesianismo un nuevo ropaje de la física aristotélica, una ideología de recambio –apriorista y dogmática– que había que combatir en nombre de la verdad y de la práctica experimental a que ella conduce”.

La afirmación de que el aire pesa no era nueva. Ya anteriormente se había desarrollado algunos trabajos que mencionaban el peso del aire, por ejemplo, con Nicolás Cusa, Beeckman, Balliani y hasta el mismo Galileo Galilei. Pero quien encaró esta cuestión más a fondo fue el físico italiano Evangelista Torricelli, para quien el aire además de rodear la tierra, también pesa y causa efectos sobre los cuerpos que rodea; pues demostró en un experimento público, conocido como el célebre experimento de Italia, la existencia del vacío y la acción externa del aire, experimento que ya vimos anteriormente (fig. 5).

Este experimento demostraba que la suspensión del mercurio se debía a una causa externa, a saber el peso del aire exterior y así lo sostiene Torricelli al decir que: [...] “no encuentro nada extraño que el mercurio ascienda hasta equilibrarse con el peso del aire que empuja desde el exterior”.

Torricelli señala, además que no podría ser el vacío defendido por los tradicionalistas o incluso la fuerza de vacío desarrollada por Galileo la que sostiene la columna de mercurio; porque al tener uno de los tubos más espacio interno que el otro, entonces debería ejercer más influencia sobre el mercurio. Cosa que no ocurre, ya que la columna se mantiene exactamente a la misma altura en los dos tubos. Así, pues, dice:

...la fuerza tendrá que haber sido mayor en el recipiente AE puesto que allí había más materia rarificada susceptible de ejercer alguna atracción, la cual en virtud de su mayor rarefacción debería también ser mucho más potente que la materia contenida en el reducidísimo espacio B (fig. 22).

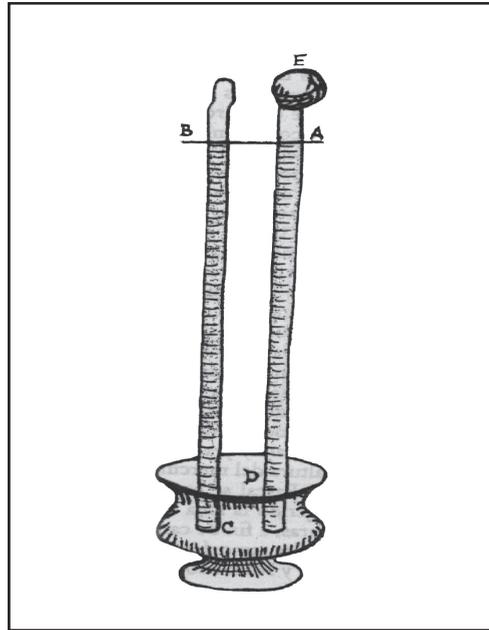


Fig. 22
Experimento de Torricelli

Con estas deducciones tan importantes, Torricelli estaba sentando un nuevo precedente en la historia de las ciencias para la humanidad. Proponer que el aire no es un elemento imponderable sino que tiene un peso y que dicho peso es la causa de todos los efectos hasta ahora determinados por el horror al vacío, era una verdadera revolución en contra de los viejos dominios de las ciencias.

El tratado del peso de la masa del aire: Blaise Pascal

La obra de Pascal refleja una transformación en el pensamiento científico. Sus tratados cambiaron la imagen que hasta el momento se tenía de la ciencia y dieron paso a una nueva forma de ver los fenómenos relacionados con la presión del aire y el equilibrio de los líquidos en los que muestra su ingenio creativo y la aguda sutileza de sus demostraciones. En uno de los apartes de su tratado sobre el peso de la masa del aire cuestiona el pensamiento tradicional diciendo:

que todos los discípulos de Aristóteles se armen de cuanto hay de valioso en las obras de su maestro y de sus comentaristas y expliquen, si es que pueden, todas estas cosas por medio del horror al vacío; si no, que reconozcan que los experimentos son los verdaderos maestros que hay que seguir; que el practicado en las montañas ha puesto fin a la creencia universal en el horror de la naturaleza al vacío, abriendo así camino a la idea –ya incuestionable– de que la naturaleza no experimenta horror alguno al vacío, que no hace nada por evitarlo, y que el peso de la masa del aire es la verdadera causa de todos los efectos que hasta ahora se venían atribuyendo a esta causa imaginaria.

Su objetivo era entonces demostrar la real existencia del vacío para poner fin a una vieja polémica y a la ciega sumisión del pensamiento de la antigüedad, pero además demostrar con todos los experimentos posibles la actividad del aire. Es así como a partir del examen de los límites de la acción del vacío y de la fuerza requerida para producirlo muestran que estos son debidos a causas externas. A continuación entra a demostrar que tal causa es el peso de la masa del aire; más precisamente que los efectos examinados pueden entenderse en términos del equilibrio o desequilibrio entre el peso de la columna del aire circundante y el del líquido considerado; es decir, Pascal considera el aire como un líquido más. Para ello desarrolla su tratado sobre el equilibrio de los Líquidos, en el cual explicita las condiciones de equilibrio desarrollando y precisando el concepto de presión, visto en el capítulo anterior.

Para hacer evidente la relación entre el aire y los líquidos, muestra que los efectos producidos en el aire también se producen en los líquidos. Primero desarrolla los experimentos utilizando líquidos y luego por analogía los interpreta para los que se suceden debido a la acción del aire. Así por ejemplo narra el siguiente:

Introduje una jeringa en un recipiente con mercurio y todo el sistema a su vez en una tina llena de agua, al comenzar a succionar el mercurio sube por la acción del peso del agua. Al hacerle orificios a la jeringa el efecto mostrado es que el agua penetra por todos los orificios y el mercurio no sube. Luego desarrollé el mismo experimento pero en vez de una tina llena de agua lo tuve sometido a la acción del aire, y encontré que los efectos mostrados son completamente análogos a los anteriores.

De esta manera Pascal asume que el aire es un líquido más y que cumple con el principio de equilibrio de los líquidos, luego entra a explicar los fenómenos atribuidos al horror al vacío como efectos del peso del aire.

El experimento del Puy de Dome

Que el aire es un líquido y por ende, su comportamiento obedece a la ley universal del equilibrio de los líquidos fue el aporte crucial señalado por Pascal en su tratado de equilibrio de los líquidos. Para demostrar tal afirmación encargó a un amigo suyo que vivía cerca de las montañas de Auvernia (Francia) para que hiciera un experimento en el pie y la cima del Puy de Domé. Experimento que fue relatado de la siguiente manera:

Realizamos el experimento primero al pie de la montaña con dos tubos llenos de mercurio en la forma acostumbrada con el experimento de Italia. Fijo uno de los dos tubos en el recipiente a modo de experimento ininterrumpido y lo dejé en aquel lugar... y así con el otro tubo y parte del mercurio me encaminé a repetir el experimento en lo alto del Puy de Domé, cuya cumbre está situada a unas 500 toesas por encima del convento de los Mínimos. Allí se constató que el mercurio sólo se elevaba hasta una altura de 23 pulgadas, 2 líneas. Por lo tanto entre los dos tubos, el del pie de la montaña y el de la cima había una diferencia de 3 pulgadas y una línea... (fig. 23).

La explicación de este asombroso hecho, de la variación del mercurio con la altura, es la siguiente. El aire por su peso ejerce presión sobre el mercurio que está en el recipiente, haciéndolo subir a través del tubo hasta un nivel de 75 cm., aproximadamente en la parte baja de la montaña. Pero en la parte alta la cantidad del aire es menor, ya que está más enrarecido, y por lo tanto su peso, y de hecho su presión es menor. Esto es lo que hace que el mercurio no suba hasta el mismo nivel sino que ascienda a menor altura. Pascal llegó incluso a proponer que “si llegamos a una altura límite donde prácticamente no hay aire el mercurio no asciende por el tubo”.

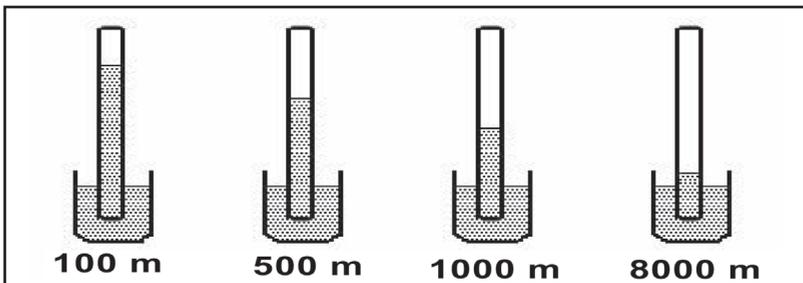


Fig. 23
Experimento del Puy Domé

Este experimento de trascendental importancia dejó sin piso a los que sostenían que el aire no pesaba ni podía actuar sobre los cuerpos o sobre el medio en general. Y además se convirtió en base fundamental para las posteriores demostraciones sobre la acción del peso y la masa del aire, para explicar muchos fenómenos que no podían ser explicados con la Teoría del Horror al Vacío.

El barómetro o baroscopio

Seguramente y sin saberlo, Torricelli inventó el primer baroscopio (fig. 24) de que se tiene noticia. La perfección del experimento al utilizarlo en diferentes alturas por Pascal permitió con el tiempo saber que era posible identificar las condiciones climáticas con este sencillo instrumento, llegando a convertirse en lo que hoy se denomina un barómetro de mercurio.

Toricelli mismo decía que una atmósfera era la presión debida a todo el peso de la gran masa de aire circundante actuando sobre la columna de mercurio, equivalente por lo tanto a 76 cm de una columna de mercurio o 10,5 metros de una columna de agua a nivel del mar (hoy en día llamado 1 torr).

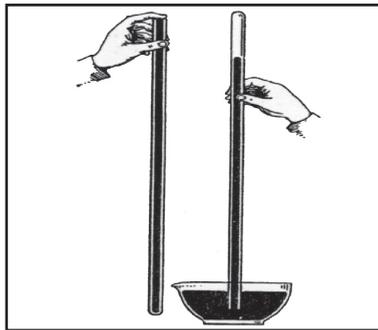


Fig. 24
El barómetro de mercurio

El experimento de Auzout

Se introduce un tubo CF con un recipiente H dentro de otro mayor AB con un tapón en G (fig. 25) y luego se procede a llenar de mercurio todo el conjunto a través del extremo F mientras se taponan el otro extremo A con el dedo, luego se procede rápidamente a sellar herméticamente F, al sumergir en un recipiente D también lleno de mercurio, se observa que:

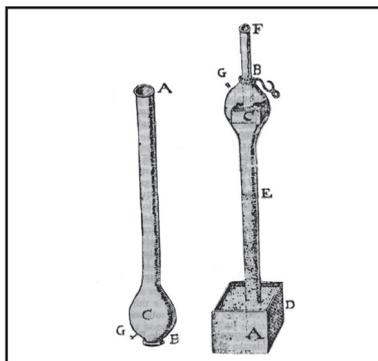


Fig. 25
Experimento del vacío de Auzout

a) Al retirar el dedo que taponaba a A, el mercurio cae por ambos tubos; en el tubo CF cae totalmente, mientras que en el tubo AB cae hasta una altura de 27 pulgadas, según Auzout.

b) Cuando se destapa el tubo AB por el tapón que tiene en G se observa que el mercurio del tubo AB cae totalmente, pero el mercurio que se encuentra en H sube violentamente por el tubo CF hasta alcanzar una altura de 27 pulgadas.

Este experimento demuestra que el aire que entra por el tapón G es la única causa que ejerce presión sobre el mercurio contenido en H obligándolo a subir por el tubo CF que se encontraba vacío por la caída inicial del mercurio al retirar el dedo de A hasta equilibrarse en una altura de 27 pulgadas o 76 cm de mercurio a nivel del mar. De acuerdo con el principio de Pascal podemos decir que la presión del aire que entra es mayor que la presión que hay dentro del tubo, prácticamente vacío, por lo tanto la diferencia de presiones obliga al mercurio a ascender por el tubo.

Actividad: Explique por qué razón el mercurio cae totalmente por el tubo AB.

Experimento del vacío en el vacío de Pascal

Pascal concibe un doble tubo como el que se muestra en la figura (fig. 26) curvado en su parte inferior B, sellado por el extremo superior A, tapado con un dedo en M y abierto por el extremo inferior N por donde se introduce mercurio hasta llenarlo, luego se tapa con un dedo en N y se invierte todo el conjunto sumergiendo parte de él en un recipiente.

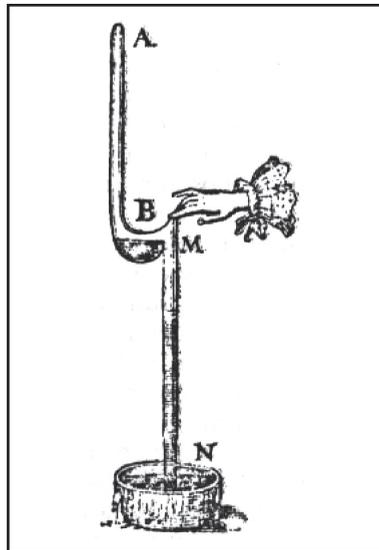


Fig. 26

Experimento del vacío en el vacío de Pascal

Actividad. Explique lo que sucede con el mercurio en los dos tubos una vez se retire el dedo del extremo inferior N

Actividad: explique lo que sucede con el mercurio en los dos tubos una vez se quite el dedo en M.

El experimento de Roberval

Los experimentos para demostrar la acción del aire fueron contundentes en los casos anteriores pero se hacía considerando la acción total de la masa de aire circundante. Roberval se ingenió un experimento para mostrar la acción del aire encerrado en un recipiente donde una vejiga prácticamente se hincha en el vacío torriceliano. Se introduce un globo medio desinflado en el barómetro de Torricelli, al invertir el tubo se sabe que el mercurio desciende por el tubo hasta una altura de 27'' (fig. 27) pero el globo que queda en el espacio vacío comienza a inflarse lentamente, tanto como el recipiente se lo permita.

Actividad: explique las razones por las cuales el globo se infla en el vacío.

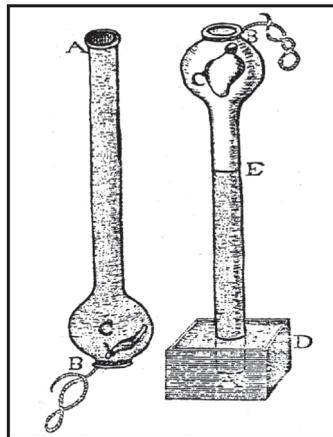


Fig. 27

Experimento de la vejiga de Roberval

Experimento de Charleton

En el siglo XVII un experimento influyente en la recuperación del atomismo griego fue el de Walter Charleton (1620-1707) quien defendió las ideas de Torricelli al demostrar de otra forma que el espacio que está situado encima de la columna de mercurio no contiene aire. Cuando el barómetro de Torricelli se inclina respecto a la perpendicular por debajo de los 76 cm (fig. 28) el nivel de mercurio asciende por el tubo hasta llenar todo el tubo, la pregunta de Charleton seguramente era a donde podía ir el aire que supuestamente existía en ese espacio ya que la parte superior estaba herméticamente cerrada y no se veían burbujas pasando a través del mercurio.

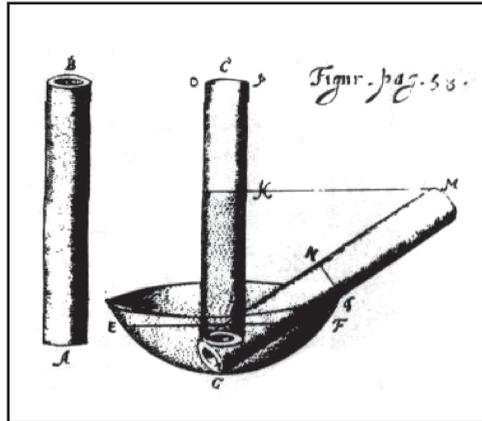


Fig. 28
Experimento de Charleton con el barómetro

Pascal repitió este experimento y lo explicó desde el principio de la diferencia de presiones. Sea cual sea el grosor del tubo, el mercurio siempre se elevará a la misma altura ya que el equilibrio de los líquidos depende de su altura y no de su volumen. Entonces el aire presiona sobre el mercurio para hacerlo subir. Cuando éste llega a la altura de antes, es cuando los dos líquidos se equilibran entre sí, porque la presión de la columna de mercurio a esa altura es igual a la presión del peso de la masa del aire exterior

Actividad: Explica lo que sucede al barómetro al levantar nuevamente el tubo y ponerlo en posición vertical.

Experimento de los discos de mármol

La máquina neumática o máquina de extracción de aire inventada por Robert Hooke para su amigo Robert Boyle y que se puso en funcionamiento en 1662 le permitió a este último realizar varios experimentos para analizar el comportamiento de algunos fenómenos relacionados con el aire (en el capítulo siguiente veremos en detalle el funcionamiento de esta máquina) entre ellos “el bien conocido y muy discutido fenómeno de la cohesión espontánea de discos de mármol pulimentados”. Tenemos dos discos de mármol idénticos A y B de superficies pulidas y completamente lisas puestas en contacto una con la otra, como lo muestra la figura (fig. 29).



Fig. 29
Experimento con los discos de mármol

El disco A que se encuentra en la parte superior esta unido por una cuerda a un tercer disco C a través de una polea, cuando el aire permanece dentro de la campana se observa que los discos A y B permanecen unidos y es difícil separarlos, al extraer aire de la campana se observa que los discos A y B se separan y el disco C comienza a descender.

Actividad: explica ¿cuál es la razón por la cual las superficies A y B se pueden separar?

Actividades adicionales

Se puede realizar la recontextualización de experiencias para considerar el comportamiento del aire en otro tipo de experimentos con jeringas, tubos, sifones, pitillos...

Experimentos con jeringas

Se pueden hacer experimentos con jeringas de distintos diámetros sumergidas en distintos líquidos como mercurio, agua, aceite... con el émbolo perfectamente ajustado, de forma que su abertura se sumerja una pulgada y el resto de la jeringa se mantenga en posición vertical. Tiramos el émbolo lentamente hacia arriba. Describa comportamientos observados, compare unos líquidos con otros...

Pregunta: la fuerza para tirar el émbolo hacia arriba ¿cambia con el diámetro de la jeringa o es la misma? argumente su respuesta.

Experimentos con tubos

Se llena de vino un tubo de cristal de 16 metros de longitud, abierto por uno de sus extremos y cerrado por el otro (fig. 30). Se coloca boca abajo y sumergido en un recipiente lleno de agua. El vino comienza a descender por el tubo (mezclándose con el agua) hasta cierta altura (10,5 m) en la que no descenderá más, y formará un espacio vacío en el interior del tubo.

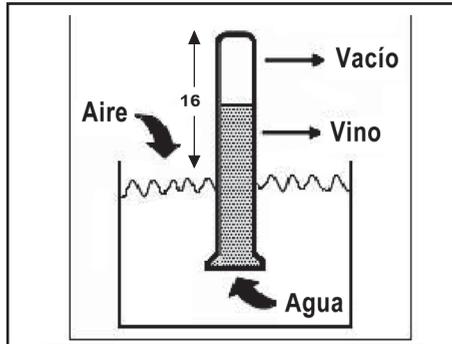


Fig. 30
Tubos con vino

Actividad: explique la razón por la cual el vino desciende hasta el punto donde el peso de su columna se equilibra con el peso de la columna de agua que presiona hacia arriba.

Dentro de los llamados experimentos mentales de Pascal, pensó el siguiente: tomamos un tubo de cristal de 20 pies de longitud (fig. 31). Lo aplicamos contra el muslo de una persona y en tal estado se sumerge en una tina llena de agua de forma que el extremo superior quede fuera del agua. Efecto: la carne del muslo se hincha en el sitio donde se encuentra aplicado el tubo.

Actividad. Explica la razón por la cual se produce este fenómeno.

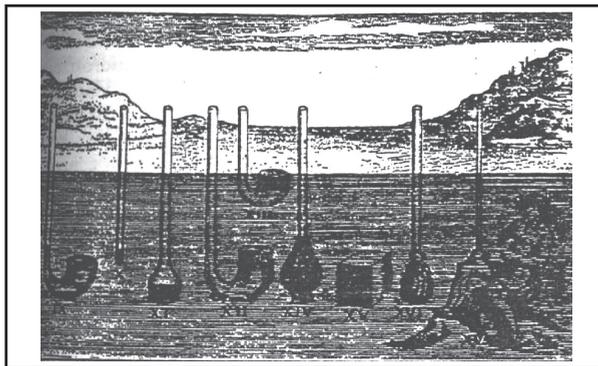


Fig. 31
Experimentos mentales de Pascal

Experimentos con pitillos

Tomar un tubo abierto tanto por arriba como por abajo (o sea un pitillo) y sumergir su parte inferior dentro de un líquido. Por el otro lado sorber. Es lógico que el líquido comience a subir a través del tubo hasta llegar a la boca de la persona.

Actividad: discuta con los compañeros la siguiente explicación; el agua está sometida a la presión del aire por todas partes excepto por aquella donde está la abertura inferior del pitillo, ya que los músculos respiratorios hacen que se hinche el pecho y aumente la capacidad interior del cuerpo, por lo tanto se produce más espacio libre que antes y de esta manera la resistencia que ofrece el interior del cuerpo a que entre el agua es menor que la fuerza del aire exterior que presiona por las demás partes del agua para hacerla penetrar. Las diferentes presiones sobre el líquido son las que hacen que éste tienda a subir por el sitio donde hay menos presión

Experimentos con sifones

Llenamos de mercurio un sifón que posee un brazo más largo que otro, y de 1 m. de longitud aprox. el más corto. Introducimos sus brazos en recipientes con mercurio en forma completamente vertical (fig. 32), cuando el sifón se encuentra en posición perpendicular, el mercurio cae por ambos brazos hasta una altura de 76 cm. Si ahora tomamos el mismo dispositivo, pero inclinamos el sifón por debajo de la altura de 76 cm, el mercurio comienza a ascender nuevamente y a pasar de un brazo a otro; y es del brazo más corto al brazo más largo vaciando el recipiente donde está inmerso.

Actividad: explique el funcionamiento del sifón

Actividad: explique cómo es el comportamiento del sifón si en lugar de mercurio hacemos el experimento con agua.

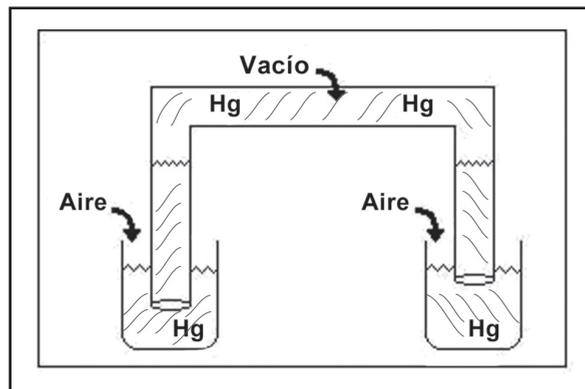


Fig. 32
Sifones inclinados

LECTURA COMPLEMENTARIA
PASCAL Y LA ESTÁTICA DE LOS FLUIDOS
ALEXANDRE KOYRE

(Fragmento 2)

El peso del aire y el horror al vacío: A Pascal y sus célebres trabajos debe la historia unir, en un símbolo admirable, el peso del aire con la destrucción del mito del horror al vacío. Y, sin embargo, ese peso había sido afirmado por numerosos precursores, como Nicolás de Cusa, independiente de la cuestión del vacío. Cardano sería el primero, según parece, en interrogar a la experiencia al respecto, en el cuadro de teorías, por lo demás frágiles, sobre la resistencia de los fluidos: así, estimaba que el aire es cincuenta veces menos pesado que el agua. Un médico del Périgord, Jean Rey, tuvo el mérito de plantear ese problema en 1630 por vía química, atribuyendo al aire el aumento de peso que se observa al calcinar estaño. Con Isaac Beeckman aparece, sin relación precisa, la doctrina de que el aire pesa y la de la existencia del vacío. Baliani confiaba a Galileo la misma opinión. El ‘propio Galileo admitía que la resistencia al vacío podía ser limitada; sus experimentos sobre el peso del aire le dieron como resultado una densidad mitad de la real. En cuanto al P. Merssene, aplicando sin restricción a la caída de los cuerpos en el aire y en el agua las leyes de la Dinámica escolástica, hallaba para el aire una densidad 1900 veces menor que la del agua aproximadamente.

En otoño de 1646, P. Petit repitió en Ruán, ante los dos Pascal, padre e hijo, el experimento de Torricelli. Ha dejado al respecto una narración que es un modelo de protocolo experimental y no deja en el tintero ningún detalle de la realización. El propio Pascal repite públicamente el experimento con numerosas variantes y lanza verdaderos desafíos a sus contradictores. En sus *Expériences nouvelles touchant le viúde* (1647), Pascal no se atrevía aún a proclamar el absurdo del horror al vacío y se limitaba, a ejemplo de Galileo, a afirmar que “la fuerza de ese horror es limitada y parecida a aquella con que tiende a caer el agua situada a cierta altura, que es de unos treinta y un pies”, pero desde este momento ve lo que se le ha escapado a Galileo; la experiencia se hace siempre encima de recipientes en libre contacto con la atmósfera.

Tiene ya la idea de que es la presión del aire atmosférico, consecuencia de su peso, lo único que sostiene el mercurio en el tubo de Torricelli. Ello no obstante, el propio Pascal menciona la objeción que puede hacerse, objeción en la que hay una clarísima alusión a Descartes: el peso del aire no es incompatible con la existencia de una “materia imperceptible, inaudita y desconocida para todos los sentidos y que llena el espacio vacío en apariencia”, la cual se forma en lo alto del tubo con el que se experimenta.

La gran experiencia: En este contexto es donde hay que situarse para comprender la experiencia de Puy de Dome, cuya documentación publicó Pascal en octubre de 1648. El primero de estos documentos es una carta de Pascal a su cuñado Florin Périer, consejero en la Cour des Aides de Clermont, pidiéndole que realice una experiencia “decisiva”, aprovechando su proximidad a la alta montaña de Auvernia. Se trata de “hacer la experiencia ordinaria del vacío”,

es decir, la experiencia de Torricelli, “varias veces un mismo día, con el mismo tubo, con el mismo mercurio y unas veces al pie de una montaña de quinientas o seiscientos toseas de altura y otras en su cima”. Porque, añade Pascal, “es perfectamente seguro que hay mucho más aire que pesa en el pie de la montaña, de manera que no debería decirse que la naturaleza tenga más repugnancia al vacío en el pie de una montaña que en su cima”. Esta frase caracteriza la originalidad de Pascal. Originalidad que, efectivamente, no reside en la experiencia misma, sino en la fe en su éxito y en su interpretación.

Hoy se sabe mejor que Pascal no es, en esta época, el único en pensar que puede ser útil “experimentar si el mercurio sube tan alto cuando está en la parte alta de una montaña como cuando está en la parte baja”. La expresión es de Descartes, y precisamente dirigida a Pascal, en una carta a Mersenne del 13 de diciembre de 1647 en la que el gran adversario del vacío anota las observaciones que realiza por su parte en relación con las variaciones –del orden de una pulgada– de la altura de mercurio en un mismo lugar, según las condiciones atmosféricas. Pero la correspondencia de Mersenne muestra que el caso de Descartes no es aislado. En este momento de la Historia, todo el mundo cree en el peso del aire y en su influencia sobre la altura del mercurio y está a la orden del día el problema de saber si se puede evidenciarlo por la variación en función de la altitud del lugar de observación. Descartes se muestra favorable mientras que Mersenne, indeciso en lo que se refiere a la noción de vacío, y Roberval, que es un partidario decidido, dudan de su éxito y, en consecuencia, de su interés. En efecto, todo depende del orden de importancia que los diversos antagonistas atribuyen al peso del aire y a su espesor en torno a la Tierra, por que según lo que se admita a este respecto puede dudarse que la altitud de una montaña baste para definir una variación de la altura del mercurio de una magnitud lo suficientemente elevada como para que se distinga de las otras variaciones constatadas.

Es curioso leer en el relato que hace Florin Périer de la “gran experiencia” realizada bajo su dirección el 19 de septiembre de 1648 que este día “fue muy inconstante” y que, sin embargo, las alturas del mercurio medidas varias veces tanto en la falda como en la cima del Puy de Dôme, así como en una estación intermedia, fueron siempre exactamente las mismas. Si bien las observaciones realizadas en la cima y en la estación intermedia probablemente fueron de corta duración, el observador que quedaba en la parte baja de la montaña tuvo todo el día para constatar que la altura de mercurio no había sufrido ningún cambio en su lugar “aunque el tiempo hubiera sido muy inconstante: a veces sereno, otras lluvioso, o lleno de nieblas, o ventoso”. ¿Quién lo va a creer?, incluso teniendo en cuenta que las medidas de Périer están dadas con la precisión de un cuarto de línea, es decir, con poco más de un semimilímetro. Hay en ello la precisión suficiente como para que sea muy sospechosa la afirmación de la constancia de la altura del mercurio en la falda de la montaña durante toda una jornada de condiciones atmosféricas variables.

El relato de Périer, del que Pascal declara “que ha aclarado todas sus dificultades”, elimina demasiado bien por la negativa, y por razones didácticas, lo que nosotros podríamos denominar fenómenos secundarios. En realidad, y es significativo que Pascal no quiera confesarlo, lo que proporciona el éxito a la “gran experiencia” es que el orden de importancia de la diferencia de

alturas del mercurio entre la falda y la cima del Puy de Dome (más de tres pulgadas) supera tan ampliamente las variaciones localizadas hasta entonces en función de las condiciones atmosféricas, que es necesario reconocer que la diferencia de altitud tiene una importancia mayor, y reformar la evaluación del peso del aire, variable con la altitud. Sobre los porcentajes descubiertos en el Puy de Dome, el P. de La Marre podía evidenciar una diferencia de 4 milímetros y medio entre el pie y la parte alta de las torres de Notre –Dame de Clermont y el propio Pascal podía encontrar un resultado del mismo orden en la torre de Saint– Jacques de París, sin temor esta vez a los fenómenos secundarios, al ser las observaciones muy próximas en el espacio y en el tiempo.

Vemos así en qué sentido se ha revelado eficaz esta “gran experiencia” de la que Pascal dice que “un anhelo universal la había hecho famosa antes de que se realizaría” Permite, efectivamente, prever el éxito de otras experiencias más seguras en cuanto a poner en evidencia el factor principal de sustentación de la altura barométrica. Vemos también, sin embargo, las reservas que conviene hacer en cuanto a su carácter decisivo.

La verdadera experiencia decisiva es aquella de la que habla Pascal como de pasada al comienzo de su carta a Périer; es la experiencia del vacío en el vacío, que consiste en colocar, mediante un dispositivo apropiado, un tubo de Torricelli en el interior de un vacío barométrico y en constatar que el mercurio “desciende por completo”, al no estar “ni presionado ni contrabalanceado por aire alguno”. Su paternidad pertenece sin discusión a Roberval, y si no puede dudarse de que Pascal la haya realizado por su cuenta, como él afirma, sí *que se puede dudar de la fecha del 15 de noviembre de 1647, fecha que señala en su carta a Périer en la publicación de octubre de 1648. La positiva lección de la crítica de los textos es que en el invierno de 1647 a 1648 Pascal encontró en qué fundar la afirmación de que “la naturaleza no tiene repugnancia alguna al vacío ... , que todos los efectos que se han atribuido a esta repugnancia provienen del peso y la presión del aire”, pero tuvo que situar en otros aspectos su aportación original, al no poder invocar para sí la experiencia decisiva.*

Sigue siendo mérito de Pascal el haber prescrito y realizado a la vez una experiencia espectacular en el ambiente de los debates complejos entre adversarios y partidarios del vacío, aun cuando conscientemente se negara a dar la versión exacta en aras de un nuevo dogmatismo.

El barómetro y la máquina neumática. La comprensibilidad del aire: *Lo que no aparecía en el Récit de la gran experiencia, aparece con abundancia de detalles en los trabajos póstumos sobre el Équilibre des liqueurs y la Pesanteur de la masse de l’air, publicado en 1663. En ellos Pascal se revela como un notable físico por la variedad de sus dispositivos experimentales, la agudeza de sus análisis y el empleo de las medidas en el conocimiento de las aproximaciones y la valoración de la jerarquía de los términos. Así pues, uno no se sorprende de encontrar, como apéndice a estos tratados, Los fragmentos, cuya redacción puede ser situada en 1651 y en los que Pascal asume esos fenómenos secundarios cuidadosamente descartados en el Recit. Y los asume tan bien que llega hasta describir cuatro dispositivos susceptibles de mostrar la variación de las condiciones atmosféricas, en particular; un sifón cuyo rendimiento disminuye con la presión atmosférica.*

Pero la aplicación del tubo de Torricelli de forma sifoide para la predicción de la lluvia y el buen tiempo no es obra de Pascal; se debe a Otto de Guericke, cuyo espectacular instrumento (¡un flotador ligado con un hilo a una figurilla que permite concretar, las variaciones de la presión atmosférica por las inclinaciones de un brazo) se describe en la obra *Experimenta nova Magdeburgica de vacuo spatio* (1662), terminado en 1663.

No obstante, el nombre de barómetro es una denominación tardía que se impuso solamente después del *Essai sur la nature de l'air*, publicado por Mariotte en 1676.

Experimentador notable, Otto de Guericke probó el peso del aire y su elasticidad independientemente de Torricelli. Pero su talento práctico lo orientó por caminos distintos de los de Pascal. Desde 1632 se dedicó a la búsqueda de un instrumento capaz de extraer el agua de un recipiente completamente lleno con el fin de producir en él el vacío. El fracaso de sus intentos lo movió a proceder con un recipiente lleno sólo de aire, y así llegó a la bomba neumática y al célebre experimento de los hemisferios de Magdeburgo, presentado a la Dieta de Ratisbona en 1654. Robert Boyle (1627-1691), que aportó algunas mejoras al mecanismo de la bomba, sustituyendo la palanca que gobernaba el pistón por una cremallera movida en los dos sentidos por una rueda dentada y que realizó de modo aún más satisfactorio los experimentos de Guericke –principalmente el del timbre encerrado en el recipiente vacío, de modo que no se oye su sonido– gracias a la forma de campana espaciosa dada al recipiente, reconoció formalmente en Guericke al inventor (*New experiments physico-mechanical*, 1660). A Guericke hay que atribuir también la idea de utilizar en el interior del recipiente un manómetro destinado a poner de manifiesto la rarefacción del aire y a medir, por tanto, en cierto modo, el vacío.

Las sucesivas mejoras aportadas a la máquina por Huygens, Denis Papin y algunos otros físicos conocidos se refieren a detalles de técnica operatoria –grifos de doble o triple perforación, válvulas, etc.– destinados a reducir las pérdidas o los espacios perjudiciales. Mas puede decirse que no alteran el principio fundamental, y que a mediados del siglo XVII, con Pascal y Guericke, el vacío conquistó derecho de ciudadanía en la Ciencia. Sería, empero, erróneo creer que en esa época la experiencia barométrica y su correcta interpretación no suscitan ya contradicción. Contradicción, por lo demás, bienhechora, pues a ella se deben los experimentos de Boyle sobre la elasticidad y la compresibilidad del aire (1661). Pero Boyle no reconoció el interés de sus resultados cuantitativos, y dejó a Towneley la prioridad de concepción y enunciado de la llamada a veces, todavía, injustamente, ley de Mariotte: la de la proporcionalidad inversa del volumen y la presión a temperatura constante. Esta ley, cuya verificación experimental, repetida varias veces, dio origen a una serie de perfeccionamientos en las bombas de compresión y en los manómetros, tropezó también con numerosos contradictores. Jacques Bernoulli afirma concretamente (1683) que, por debajo de un cierto volumen, cuando todas las moléculas de aire se tocan, no es posible ya ninguna compresión. Pero mientras que Mariotte, que reconoció la importancia de la ley y volvió a verificarla (1679), creía en la existencia de otro límite –imposibilidad de rarificar el gas por debajo de la 4000a parte de la concentración normal–, Amontons fue capaz de probar, en el año 1702, que no hay razón para admitir tal hipótesis y que la ley está pura y simplemente ligada a una temperatura constante.

Actividades de seguimiento y valoración

1. ¿Qué quiere decir Anaxímenes con la frase “el aire es inagotable”?
2. Si para los griegos el aire no pesa en su lugar natural, ¿cómo saber que el aire pesa?
3. ¿A qué se refieren cuando dicen que los aviones son presurizados?
4. ¿Cuál es la diferencia entre presión del aire y peso del aire?
5. ¿Dónde cuesta menos dificultad para respirar; a nivel del mar o en la cima de una montaña? explique su respuesta
6. Un globo de Helio de los que reparten en los parques de diversiones, ¿por qué tienden a elevarse? Podrá explotar si sube demasiado? Justifique la respuesta
7. El líquido contenido al interior de un pitillo no se cae cuando éste se encuentra tapado con el dedo por uno de sus extremos. Qué sucede si el diámetro del pitillo lo aumentamos 10 veces, ¿puede sostenerse el líquido?
8. ¿Qué le puede suceder a un globo inflado si se coloca al interior del congelador de una nevera?
9. ¿Por qué razón a las personas que viajan en carro se les tapa los oídos cuando van hacia las montañas? y ¿por qué recomiendan abrir la boca para destaparlos?
10. Explique la importancia del sifón ubicado debajo del lavadero de platos
11. ¿Qué explicación puedes dar para justificar que el aire se comporta como los líquidos?