



M

Descubriendo las moléculas: un proyecto para el aula



La Suma de Todos



CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN

Comunidad de Madrid

www.madrid.org



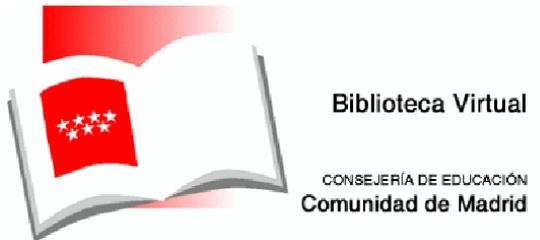
Descubriendo las moléculas: un proyecto para el aula

Material didáctico
para profesores de
Educación Infantil y Primaria



Comunidad de Madrid

CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN
Dirección General de Ordenación Académica



Esta versión digital de la obra impresa forma parte de la Biblioteca Virtual de la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid y las condiciones de su distribución y difusión de encuentran amparadas por el marco legal de la misma.

www.madrid.org/edupubli

edupubli@madrid.org

Los autores agradecen la colaboración de Salomé Cejudo Rodríguez en la elaboración del manuscrito.

Autores:

Grupo de Extensión Científica del CSIC:

José María López Sancho.

María José Gómez Díaz.

María del Carmen Refolio Refolio.

José Manuel López Álvarez.

Profesores de la Comunidad de Madrid:

Rosa Martínez González.

Montserrat Cortada Cortés.

Isabel García García.

Dirección:

José María López Sancho.

Coordinación:

María José Gómez Díaz.

Ilustraciones:

Luís Martínez Sánchez.

Colección:

Material Didáctico.

© Comunidad de Madrid. Consejería de Educación. Dirección General de Ordenación Académica.

Depósito Legal: M-21372-2006

I.S.B.N.: 84-451-2861-2

Tirada: 2.000 ejemplares



ÍNDICE

Presentación	07
Prólogo	11
Introducción	15
1. El aprendizaje de la ciencia en la escuela como parte esencial de la socialización.	17
2. Las matemáticas y la descripción científica del mundo.	21
Primera parte	
1. Breve introducción a la teoría molecular de la materia.	27
1. 1. Motivando a los alumnos: un mundo al revés.	31
1. 2. Descripción del modelo de aprendizaje.	35
1. 3. Estudio semicuantitativo de los procesos de cambio de estado.	43
■ Comprobación del modelo en los procesos naturales.	49
■ Recopilación.	53
2. El concepto de presión.	55
2. 1. Un nuevo concepto.	57
■ La presión ejercida por los sólidos.	61
■ La presión ejercida por los líquidos.	65

Segunda parte.

3. De la Grecia clásica a la revolución científica.	69
3. 1. El nacimiento del modelo <i>atómico</i> .	71
3. 2. La existencia del vacío y la oposición al modelo <i>atómico</i> .	75
3. 3. El modelo de Aristóteles.	79
3. 4. Las limitaciones del modelo aristotélico.	83
<hr/>	
4. La revolución científica.	89
4. 1. 1630: Jean Rey descubre que el aire pesa.	93
4. 2. 1638: Galileo estima el valor del <i>horror vacui</i> .	97
4. 3. 1640: el experimento de Berti.	103
4. 4. 1644: el experimento de Torricelli.	107
4. 5. 1647: el experimento de Gilles Personne de Roberval.	113
4. 6. 1648: los experimentos de Blaise Pascal.	117
4. 7. 1657: el experimento de Von Guernicke.	123
4. 8. 1717: el experimento de Desaguliers.	129
4. 9. 1969: el experimento de Armstrong en la superficie de la Luna	133

Tercera parte	
5. La presión que ejercen los gases.	139
5. 1. La Ley de Boyle.	141
5. 2. 1738: el modelo cinético de Bernoulli.	147
6. Energía, calor y temperatura.	153
6. 1. 1654: el termoscopio de Galileo.	155
6. 2. 1654: Fernando II inventa el termoscopio cerrado.	159
6. 3. 1702: Fahrenheit construye el primer termómetro.	163
6. 4. 1742: la escala de Celsius.	167
7. La naturaleza del calor.	171
7. 1. El calor, una nueva magnitud.	173
7. 2. 1674: el experimento de John Mayow sobre la combustión en el aire.	177
7. 3. El flogisto y el calórico.	181
7. 4. 1798: el experimento de un científico muy especial, Benjamín Thompson.	185
7. 5. La medida de la cantidad de calor.	189
7. 6. Una modificación del calorímetro: la bomba calorimétrica.	193
7. 7. El experimento de Joule.	197



PRESENTACIÓN

Descubriendo las moléculas: un proyecto para el aula es, tras la publicación de *Magnetismo en el Aula*, la segunda de las publicaciones que aparece como resultado de la colaboración entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Dirección General de Ordenación Académica.

El trabajo conjunto de las dos instituciones deriva del acuerdo que se firmó en el curso 2004-2005 con el objetivo de iniciar la enseñanza de la ciencia en los primeros niveles educativos. Este acuerdo tiene dos características fundamentales: la metodología, eminentemente práctica, pues se considera que el alumno aprende ciencia haciendo ciencia, y la ayuda al maestro, al que se le proporcionan una adecuada formación teórica y unas orientaciones para experimentar lo aprendido en el aula.

En esta publicación aparecen expuestos de forma sencilla los fundamentos de la teoría molecular y su aplicación práctica. En su redacción han colaborado investigadores del CSIC y maestras del CEIP *Fontarrón*, que realizaron los experimentos con sus alumnos. Los escolares de los centros *Los Gorriones*, *Navalazarza*, *Siglo XXI*, *Jorge Guillén* y *Balder* experimentaron también en sus aulas la teoría de las moléculas y acudieron a la VII Feria *Madrid por la Ciencia*, en abril de 2006, para exponer el trabajo que se recoge en este libro.

Esperamos que *Descubriendo las moléculas: un proyecto para el aula* le sirva al profesor para complementar su formación científica y para entender la importancia de que los escolares se inicien en la ciencia a edades tempranas.

Alicia Delibes Liniers
Directora General de Ordenación Académica



PRÓLOGO

Afortunadamente, ya no es necesario dar razones que justifiquen la enseñanza de la ciencia en las primeras etapas de la educación, puesto que actualmente está contemplada en todos los currículos del mundo occidental.

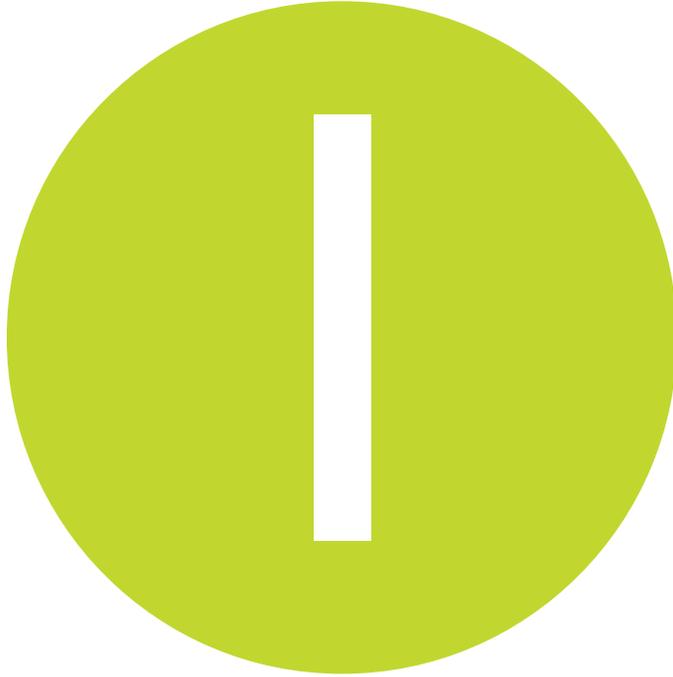
En esta etapa de la enseñanza se ha consolidado un nuevo paradigma identificado por dos características fundamentales: *la manera de enseñar*, en la que el alumno aprende ciencia haciendo ciencia, y *la ayuda al maestro*, proporcionada por la colaboración entre los profesores y los profesionales de la investigación científica. El libro que el lector tiene en sus manos se ha elaborado de acuerdo con estas ideas, y es el resultado de la colaboración de científicos del CSIC y maestros de la Comunidad de Madrid. Ha sido escrito con la intención de facilitar al maestro los elementos indispensables para introducir la teoría molecular en su aula, aportando ejemplos sencillos que puede incluir fácilmente en sus proyectos didácticos.

El propósito de los autores es ayudar al profesor a situar al alumno en el papel de investigador, realizando de forma conjunta con sus compañeros experimentos sencillos, de manera que desarrollen su poder de observación, su curiosidad por el mundo y su capacidad de asombro.

Desde el punto de vista social, creemos que la adquisición de conocimiento científico de forma experimental y cooperativa es un medio esencial para la integración de alumnos de diferentes culturas, ya que desarrolla tanto el espíritu crítico como el respeto por las opiniones de los demás.

Esta forma de presentar la ciencia, integrándola con la utilización de los recursos de Internet, es parte de la nueva cultura que define la sociedad de la Unión Europea, respetando las identidades de los pueblos que la forman, a la vez que son útiles para preparar al alumno para vivir en un mundo cuyas posibilidades son difíciles de predecir.

El libro está dividido en siete capítulos. En el primer capítulo se presentan los fundamentos de la teoría molecular siguiendo un camino estrictamente constructivista; en el segundo, apoyándonos en las ideas intuitivas que el alumno tiene, se introduce el concepto de presión de una manera semicuantitativa. Una vez que nos encontramos en posesión de estos conocimientos, realizamos un recorrido histórico desde la Grecia clásica hasta la revolución científica, donde se exponen los conocimientos precientíficos, primera explicación del comportamiento de la naturaleza. En los capítulos cuarto y quinto, siguiendo un itinerario histórico, se describe el proceso de los descubrimientos científicos, que conllevó la deconstrucción de las antiguas creencias. Esta presentación se ha elegido pensando en la utilidad que esta información pueda tener desde el punto de vista cultural, así como en sus posibilidades como base de relatos que pueden elaborarse, dirigidos a los alumnos. Finalmente, como complemento al modelo molecular, se introducen los conceptos de energía, calor y temperatura, mostrando la nueva visión de la naturaleza que se consigue a la luz de estas nuevas ideas. Esperamos que todo ello sea de utilidad para el maestro, al que va dirigido esta obra.



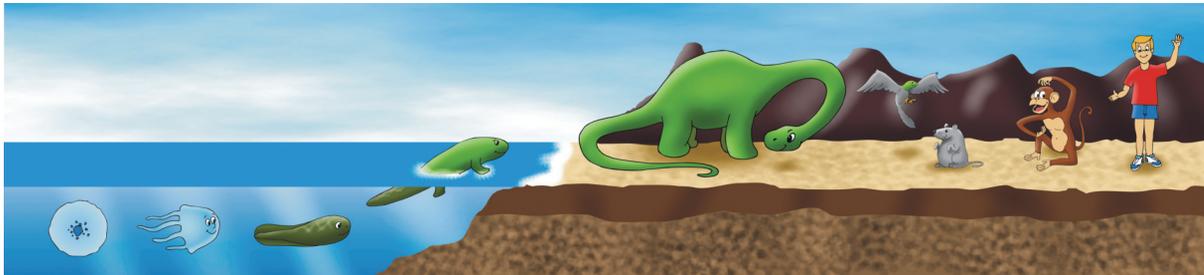
INTRODUCCIÓN



EL APRENDIZAJE DE LA CIENCIA EN LA
ESCUELA COMO PARTE ESENCIAL DE LA
SOCIALIZACIÓN

La enseñanza de la ciencia en la etapa infantil tiene su fundamento en la naturaleza del ser humano, cuya diferencia fundamental con las demás especies está en la forma en que evoluciona, distinta en todo a la que descubrió y describió Darwin. Nuestra especie no se adapta al medio, modificando su cuerpo, como hacen

las demás especies, sino por la adquisición y acumulación de conocimiento que se almacena y transmite de una generación a la siguiente. Este proceso de evolución y adaptación es nuevo en biología y sólo nosotros, los seres humanos, lo poseemos.



Evolución darwiniana: la naturaleza necesitó millones de años para transformar un dinosaurio en un animal capaz de volar, o un pez en un ser que pudiera desenvolverse en tierra firme.

Evolución específica de la especie humana: en sólo unos miles de años hemos visto cómo el *homo sapiens* pasa de pobre recolector de frutos silvestres, no ya a ser capaz de volar, sino a lanzar satélites artificiales e incluso a viajar hasta la Luna.



Esta evolución no darwiniana, recién descubierta por la naturaleza, se basa tanto en el hecho asombroso de que “*el mundo pueda entenderse*”, como en la facilidad e incluso la necesidad que presentan los seres humanos desde niños, de absorber todo el conocimiento que tienen a su alcance. Ofrece, además, una gran ventaja: cuesta mucho menos aprender a nadar que a desarrollar aletas; y, sobre todo, cuando hay que salir del agua no es necesario desprenderse de las aletas y desarrollar pies o patas.

Las ventajas no acaban ahí. Aunque el descubrir e inventar requieren a veces tiempo, paciencia y mucha inteligencia, que sólo unos pocos agraciados poseen, el resto de los mortales tenemos la capacidad (algo que asombraba a Einstein) de poder comprenderlo cuando nos lo explican. Nuestros jóvenes, antes de cumplir los treinta años, son capaces de construir rascacielos, fabricar aviones y desarrollar ordenadores. Y todo ello sin modificar en absoluto la forma de sus cuerpos.

Pero este medio de evolución también tiene sus inconvenientes. Un pollo de águila o de codorniz, nacido en incubadora y alimentado artificialmente, cuando llega

el momento vuela sin ninguna dificultad porque posee el conocimiento necesario sin necesidad de que nadie se lo haya enseñado. En cambio, un niño criado en un entorno no humano no aprende ni siquiera a andar sobre dos piernas, y mucho menos a hablar.

De acuerdo con estos argumentos nuestro primer postulado se puede expresar de la forma siguiente: *lo esencial en la naturaleza del ser humano es su mecanismo especial de evolución: la construcción de conocimiento y su transmisión de unas generaciones a las siguientes.*

Pero nuestra sociedad sufrió un cambio importante en los siglos XVI y XVII. En esa época tuvo lugar la revolución científica. A partir de entonces, los conocimientos se organizaron en modelos y teorías y se trataron mediante procedimientos matemáticos, el lenguaje en el que, como dijo Galileo, el gran libro de la naturaleza está escrito. De aquí se desprende nuestro segundo postulado: *la ciencia, la mejor forma de estructurar los conocimientos, ha de ser incluida en la enseñanza.*

No es lo mismo lo que se aprende cuando uno tiene cuatro o cinco años que lo que se aprende a edad avanzada. Todos sabemos que lo que permanece más tiempo en nuestra memoria, lo último que se olvida, es lo que se aprendió de niño. Por eso, siguiendo con nuestro razonamiento, tenemos que establecer como tercer postulado el siguiente: *se debe enseñar ciencia a los niños, al mismo tiempo que se les enseña a leer y escribir, los cuentos de Andersen y las canciones infantiles.* Y nosotros estamos convencidos de que privarles de la enseñanza de la ciencia en esas etapas es hurtarles la posibilidad de situarse en el punto de la historia de la humanidad en la que han nacido, derecho fundamental con el que todo ser humano nace.



LAS MATEMÁTICAS Y LA DESCRIPCIÓN
CIENTÍFICA DEL MUNDO

Einstein: *¿Sabes Henry?, Yo comencé a estudiar matemáticas pero lo dejé para dedicarme a la física.*

Poincaré: *¿De verdad, Albert? ¿Y por qué lo hiciste?*

Einstein: *Porque aunque podía distinguir lo que era cierto de lo que no lo era, no podía diferenciar lo que era importante y lo que no lo era.*

Poincaré: *Qué coincidencia. Yo empecé a estudiar física pero luego lo dejé y cambié a matemáticas.*

Einstein: *Qué curioso. ¿Y por qué lo hiciste Henry?*

Poincaré: *Porque, aunque podía distinguir lo que era importante de lo que no lo era, no podía estar seguro de si era verdad o era falso.*

Diálogo extraído de la obra *"The Constant of nature"*, de John D. Barrow.

La ciencia es posible porque la naturaleza se comporta siempre de una manera uniforme; por eso, cuando se repiten los mismos experimentos en distintos lugares y en distintas épocas los resultados son los mismos. Los filósofos de la Grecia clásica definieron este comportamiento postulando que la naturaleza seguía leyes estrictas, leyes que podíamos descubrir y comprender; este postulado constituye la base del método científico. Todos conocemos ejemplos de leyes de la naturaleza. La mayoría van asociadas al nombre del científico que las descubrió o inventó (asunto este nada claro). Y así hablamos de las leyes de Mendel, de la ley de Boyle o las leyes de Newton.

Esta manera de pensar de los griegos es, muy probablemente, un reflejo de su concepción del mundo. La vida de las personas, e incluso la de los héroes, estaba regida por el destino (a veces revelado por el oráculo), al que de ninguna manera podían sustraerse. Su mitología está llena de ejemplos de esta manera de concebir el mundo.

Pero para enunciar las leyes de la naturaleza no basta el lenguaje común que empleamos en nuestra conversación o, incluso, en las disquisiciones filosóficas. Galileo,

gran divulgador científico, escribió en 1623 que *la ciencia está escrita en ese gran libro que tenemos delante de nuestros ojos: el universo. Pero no podemos entenderlo si antes no aprendemos el lenguaje en el que está escrito: en el lenguaje de las matemáticas, y los símbolos son triángulos, círculos y otras figuras geométricas sin cuya ayuda es imposible comprenderlo.* Lo que Galileo quería poner de manifiesto es que las leyes de la ciencia tienen una característica especial, son relaciones entre números, es decir, ecuaciones; y esos números se obtienen por medio del proceso de medir, la operación más importante de la ciencia.

Estamos acostumbrados a usar ecuaciones en casi todos los aspectos de la vida. Cuando compramos manzanas sabemos que el precio total que debemos pagar es el resultado de multiplicar el precio del kilogramo por la masa de las manzanas que nos llevamos, medida normalmente en kilogramos con ayuda de una balanza:

Precio total es igual al precio de un kilogramo multiplicado por cantidad de manzanas en kilogramos o, de manera simbólica,

$$P = p \cdot C$$

donde el punto sustituye al signo de multiplicación.

Es fácil comprobar que en esta ecuación se demuestra que cuando se duplica la masa de manzanas se duplica igualmente el precio total. En ese caso se dice que éste es proporcional a la masa de manzanas y la relación que se establece en esta ecuación se dice que es *una relación lineal*.

Las leyes de la naturaleza también se rigen por ecuaciones de este tipo. La ley de Ohm nos indica que cuando se conecta una pila de 1,5 voltios (V) a una bombilla cuya resistencia es 1 ohmio (R), pasa una corriente de 1,5 amperios (I), de acuerdo con la ecuación:

$$V = I \cdot R$$

muy parecida a la que describe el precio total de las manzanas.

Probablemente la ley más conocida de la física es la debida a Einstein que se refiere a la equivalencia entre la masa y la energía:

$$E = m \cdot c^2$$

en la que aparece la masa (m) y la velocidad de la luz (c), en una expresión semejante a la que fija el precio de las manzanas o la intensidad de corriente en un circuito simple.

Podemos ir un poco más allá del enunciado de las leyes y preguntarnos cuál es el mecanismo que subyace detrás de este comportamiento de la naturaleza. Cuando Mendel obtuvo sus resultados sobre la herencia o cuando Boyle enunció la sencilla ecuación que describía la elasticidad de los gases, es seguro que se preguntaron a qué mecanismos obedecían sus leyes. Nosotros sabemos ahora que tras las leyes de Mendel se esconde el modelo de genes y tras la ley de Boyle, el modelo molecular de la materia. Una vez que nuestros alumnos descubren una ley, ya sea de forma cuantitativa u observando la forma regular y determinada en que se comportan los elementos que están manipulando, debemos hacerles ver que ese comportamiento tiene que tener su origen en la constitución de sus elementos, descrito por medio de un modelo; en el caso de la evaporación y condensación tienen que inventar un modelo que describa los hechos fundamentales del fenómeno: de qué están hechos los gases y cómo se comportan sus partes constituyentes, tarea a veces difícil pero siempre fascinante. Nosotros, en este trabajo, estudiaremos la apasionante y apasionada historia que lleva desde los inicios del atomismo griego a la teoría molecular de la materia, a través de una parte poco conocida de la revolución científica que conduce, en último término, a la moderna teoría atómica.

Para terminar esta introducción queremos reproducir un párrafo de la intervención que Richard Feynman pronunció durante la reunión anual de la Asociación Nacional de Profesores de Ciencias, en 1966.

*“Si por algún cataclismo fuese a destruirse todo nuestro conocimiento científico y sólo pudiésemos transmitir una frase a la generación siguiente, ¿qué frase contendría más información con menos palabras? Yo creo que es la hipótesis atómica: **todas las cosas están hechas de átomos, pequeñas partículas que se mueven por todas partes en constante movimiento, atrayéndose cuando están separadas por pequeñas distancias pero repeliéndose cuando se las intenta apretar unas contra otras.** En esta sola frase está contenida una enorme cantidad de información sobre el mundo, con sólo aplicar un poco de imaginación y de reflexión”.*

Este libro no es más que un viaje por una pequeña parte de la historia de la ciencia que realizaremos en compañía de nuestro lector. En principio trata de la parte que se refiere a los gases pero, como veremos en nuestro recorrido, cualquier avance de las ideas en el conocimiento humano, está íntimamente relacionado con el resto de la historia.



Primera
Parte



BREVE INTRODUCCIÓN
A LA TEORÍA
MOLECULAR DE LA
MATERIA

¿Qué conoce el pez del agua, en la que nada toda la vida?

Albert Einstein, *Out of my later years*, 1956.

Antes de comenzar el paseo por la historia, nos permitiremos recordar que se trata de un viaje por un país conocido, al menos hasta cierto punto. El hecho de que comencemos nuestro recorrido con algunos conocimientos propios del siglo XXI nos permite llevar con nosotros algunas ideas claves para entender los experimentos que los filósofos naturales van a ir realizando y los problemas que les plantean sus resultados. Además este conocimiento nos ayudará a comprender las dificultades materiales e incluso psicológicas con que se enfrentan los investigadores, tanto para elaborar nuevas ideas como para rechazar los viejos prejuicios heredados de las generaciones anteriores. La necesidad de *deconstruir* estos prejuicios o preconceptos es uno de los procesos que más dificultad encierra, tanto en la investigación como en el aprendizaje.

Comenzaremos citando algunos de los conocimientos que hoy son de todos conocidos. La materia que nos rodea y de la que estamos hechos se presenta ante nuestros ojos bajo tres formas o aspectos familiares que llamamos *estados*: sólido, líquido y gaseoso. De ellos, el que mejor entendemos es el de los gases. Vivimos en un medio gaseoso, el aire, que es fundamental para respirar, para que se transmita nuestra voz, la música o los sonidos, y que podemos emplear para refrigerar los objetos calientes o para llenar de aire los globos y las ruedas de los automóviles. Sabemos calentarlo en invierno y enfriarlo en verano, lanzarlo a una cierta velocidad por medio de abanicos o ventiladores y, sin embargo, la mayor parte del tiempo, como el pez de Einstein, no somos conscientes de su existencia.

Los griegos, constructores de los principios de nuestra cultura, pensaron que el mundo sublunar estaba formado solamente por cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. Como veremos más adelante, estos cuatro elementos, únicos componentes de todas las cosas, tendían a ordenarse verticalmente, formando una especie de cebolla gigante de sólo cuatro capas. Este modelo, aunque inicialmente constituyó un progreso en la manera de pensar, se fue convirtiendo a lo largo de la Edad Media en un prejuicio que actuó como freno a otras ideas innovadoras. Hasta el siglo XVII no se empezó a reconocer la existencia de diferentes *aires* y a estudiar sus características.

Aunque nuestros ojos no ven, en general, los gases puros (el humo, que sí se ve, es una suspensión de partículas sólidas en el aire), sí somos capaces de detectarlos por medio de instrumentos o manipulaciones. A partir de estos procesos que nos indican su existencia, podemos diseñar experimentos, inducir leyes y construir modelos imaginarios cuyo comportamiento sea semejante al del sistema real. El modelo de los gases es uno de los más importantes ya que, como dice Feynman, sus ideas básicas se aplicaron al resto de los estados de la materia.

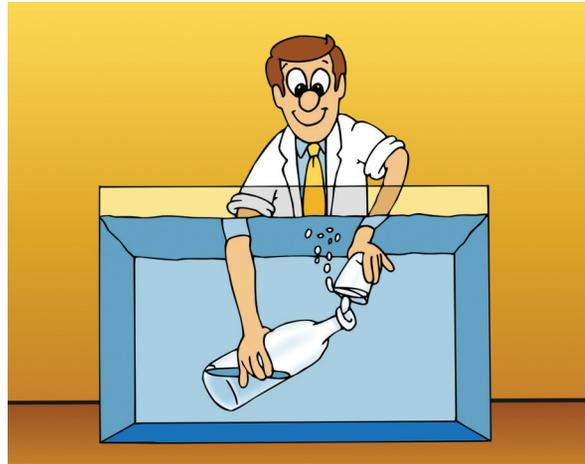


MOTIVANDO A LOS ALUMNOS:
UN MUNDO AL REVÉS

Como introducción al mundo de los gases, no estará de más que realicemos algún experimento que convenga a nuestros pequeños alumnos de que los gases existen realmente y se pueden manejar casi con la misma facilidad con que manejamos los líquidos. Para ello necesitamos un recipiente transparente, parecido a una pecera, una botella y un vaso de plástico o vidrio. Comenzamos, como indica la ilustración, sumergiendo el vaso en la pecera y dejando que se llene de agua; a continuación introducimos la botella llena de aire, manteniendo la boca en la parte inferior de manera que no se escape el aire en forma de burbujas.



Seguidamente inclinamos la botella situando su boca debajo del vaso, de manera que el aire que sale de la botella llene el vaso, desplazando al agua. Podemos llenar el vaso hasta el nivel que queramos y si una vez lleno seguimos echando aire en el vaso, veremos cómo rebosa y se dirige hacia la superficie de la pecera, justamente al revés de lo que ocurre si vertemos agua de una botella en un vaso lleno de aire fuera de la pecera, en el mar de aire en el que estamos sumergidos.



En este mundo al revés podemos seguir manipulando los gases de una forma semejante a como manipulamos los líquidos en nuestro mar gaseoso, pero como si sobre los gases actuase una especie de gravedad negativa. Con una botella llena de aire llenamos un vaso cuyo contenido podemos absorber con ayuda de una pajita de refrescos. Si queda algo en el vaso se puede recuperar y pasarlo de nuevo a la botella, operación que se facilita mucho si utilizamos un embudo.

Como nuestro lector habrá colegido, la intención de este experimento es la de impactar a nuestros alumnos con un proceso que ellos conocen sobradamente, pero cuya riqueza científica sólo se pone de manifiesto cuando se realiza con atención, analizando los resultados y meditando sobre ellos, es decir, estudiando la naturaleza.



DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE APRENDIZAJE

Una vez demostrada la existencia de los gases y la facilidad con que podemos manipularlos y estudiar su comportamiento, debemos elaborar un modelo de su constitución que explique su comportamiento. Dos son las ideas que subyacen en dicho modelo: *la constitución corpuscular de la materia*, que postula que todo está formado por pequeñas partículas; y *la teoría cinética* que supone que estas partículas obedecen las mismas leyes que los cuerpos macroscópicos, cuyo comportamiento nos es familiar e intuitivo. De acuerdo con este modelo, estas partículas presentan una elasticidad perfecta, semejante al comportamiento de las pelotas de caucho que cuando se dejan caer rebotan alcanzando prácticamente la altura inicial. En este punto informaremos a nuestros alumnos de que las partículas que forman los gases reciben el nombre de *moléculas*.

A continuación, una vez que conocemos las ideas esenciales del modelo molecular, iniciaremos el recorrido didáctico que conduzca a nuestros alumnos a la elaboración de este modelo, siguiendo un proceso basado en el constructivismo.

El primer paso consiste en presentar a los alumnos algunos resultados experimentales que permitan profundizar en las propiedades de los gases, para lo cual hemos elegido el más manejable y fácil de visualizar, y que conocemos en los tres estados: el vapor de agua. Como procedimiento didáctico proponemos realizar en el aula un experimento de condensación de vapor de agua, un gas, que nos lleve a la conclusión de que la composición del vapor y del líquido debe ser la misma y, por lo tanto, se puede explicar con el mismo modelo. Para ello realizamos en clase un experimento que nos permita estudiar un proceso conocido.

Todos sabemos que, cuando se saca del frigorífico un bote de refresco a baja temperatura, se forma sobre su superficie una multitud de gotas de agua. Estas gotas de agua aparecen sin que nuestra vista haya percibido



de dónde vienen, lo que nos enfrenta a una situación en la que el razonamiento lógico nos obliga a suplir con la imaginación lo que nuestros sentidos no perciben; si al comenzar el experimento la superficie del bote estaba completamente seca y al terminar tenemos una cantidad apreciable de agua en el plato, no nos queda más remedio que admitir que **el agua ha venido por el aire en una forma en la que no podemos verla**. Como el experimento conduce a los mismos resultados independientemente del lugar de la habitación o del colegio en el que lo realicemos, debemos concluir que el agua está en el ambiente, mezclada con el aire, en una forma en la que no la aprecia nuestra vista.

Sabemos que el ojo tiene una dificultad creciente para ver objetos cada vez más pequeños. Por eso es lógico pensar que la forma en la que el agua se encuentra en el aire tiene que ser en forma de partículas de un tamaño tan reducido que el ojo no las aprecie. A estas partículas debemos darles un nombre que las identifique; las llamaremos *moléculas*. Estas moléculas, por alguna razón, quedan *pegadas* a la superficie fría del bote de refresco. Al ir llegando más y más moléculas se unen unas a otras hasta alcanzar un tamaño suficiente para que nuestra vista pueda distinguir las. Es el momento de poner un nombre al proceso: *condensación*, para que podamos referirnos a él de una manera precisa.

A partir de este momento el alumno imaginará las moléculas viajando por la habitación. Llegados a este punto, debemos tratar en el aula la existencia del aire, conduciendo la discusión de manera que quede claro que se trata de otro gas, o gases, diferente del vapor de agua. Si el aire estuviese constituido únicamente por vapor de agua en los congeladores no habría aire, ya que se habría condensado prácticamente en su totalidad. Y si el aire es un gas, asimismo invisible, lo más lógico es pensar que está igualmente constituido por moléculas, aunque diferentes a las del agua (si fuesen iguales a las del agua, sería agua). El niño utilizará estas imágenes aplicando las herramientas de la lógica, la intuición y la creatividad, como en ninguna otra materia de estudio. Por ello es tan importante, desde el punto de vista del desarrollo de las capacidades del alumno, la enseñanza de la ciencia.

Por necesidades de razonamiento lógico nos hemos visto obligados a inventar o descubrir un “objeto nuevo”, la molécula. ¿Cuál es la naturaleza de este razonamiento lógico cuya fuerza nos obliga en algunos casos a creer en una realidad que nuestros sentidos no pueden apreciar? Pero ésta es una pregunta que no corresponde tratar en este momento.

Hemos llegado así a la conclusión de que tanto el agua en estado líquido como en el de gas o vapor son la misma cosa bajo dos aspectos y, por lo tanto, tienen que estar formados por las mismas moléculas. Podemos reforzar esta conclusión realizando experimentos en los que se estudie el proceso inverso al de la condensación.

Para ello procederemos a mojar una superficie pequeña del suelo de la clase, una baldosa, empleando un paño húmedo. La baldosa queda mojada, es decir, sobre su superficie hay muchas moléculas de agua que se tocan unas con otras.



A continuación todos miramos la baldosa fijamente y vemos que el agua desaparece ante nuestros ojos, quedando de nuevo la baldosa completamente seca. ¿Qué ha ocurrido?

Lo más fácil es pensar que las moléculas de agua han ido abandonando la superficie del suelo y pasando al aire de *una en una*. En la atmósfera están en forma de vapor de agua que no vemos, aisladas, sin tocar a otras moléculas de agua. Por eso sabemos que cuando se evaporan lo hacen de una en una. Así, casi sin darnos cuenta, el suelo se ha secado.



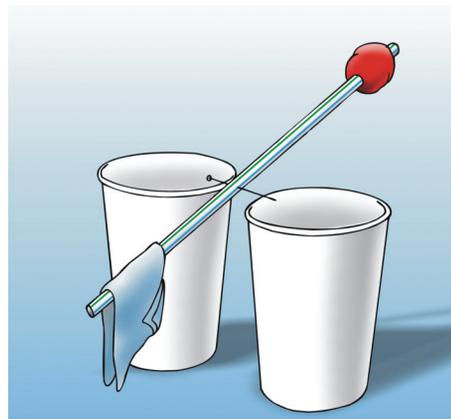
Como en el caso del experimento anterior, debemos ponerle un nombre al proceso que acaba de tener lugar ante nuestros ojos; como todos los alumnos saben, se trata del proceso de *evaporación*.

El paso siguiente consiste en investigar si nuestro modelo es válido para otros líquidos o solamente es aplicable al agua. Para contestar a esta pregunta debemos diseñar nuevos experimentos, tarea en la que nos deben ayudar nuestros alumnos con sus ideas razonadas. Lo más sencillo es repetir el último proceso estudiado empleando otros líquidos, lo que nos permitirá, a la vez, darnos cuenta de que no todos los líquidos se evaporan a la misma velocidad. El alcohol de quemar (metílico) se evapora casi inmediatamente, el alcohol etílico, que se utilizaba para desinfectar heridas, lo hace un poco más lentamente y el agua es el que más tiempo necesita de los tres líquidos. Estos resultados deben ser discutidos en el aula; los alumnos tienen que tratar de explicarlos empleando el modelo molecular, modificándolo de manera que se adapte a los nuevos hallazgos experimentales. La respuesta no es difícil: ya hemos llegado a la conclusión de que en el proceso de condensación que tiene lugar en la superficie del bote de refresco, las moléculas se adhieren unas a otras para formar gotas de líquido. Para que esto ocurra deben existir, entre las moléculas, fuerzas responsables de que se *peguen* unas a otras, llamadas *fuerzas de cohesión*. Es evidente que durante la evaporación las moléculas que se encuentran en fase líquida tienen que vencer estas fuerzas de cohesión para despegarse unas de otras y escapar a la atmósfera, lo que nos lleva a pensar que estas fuerzas de cohesión son más fuertes en el agua que en el alcohol etílico, por lo cual lleva más tiempo el completar el proceso de evaporación.

Podemos aprovechar este momento para introducir las *fuerzas de adhesión*, que aparecen entre moléculas de diferente naturaleza, responsables de que las moléculas de vapor de agua se adhieran a la superficie del bote de refresco.

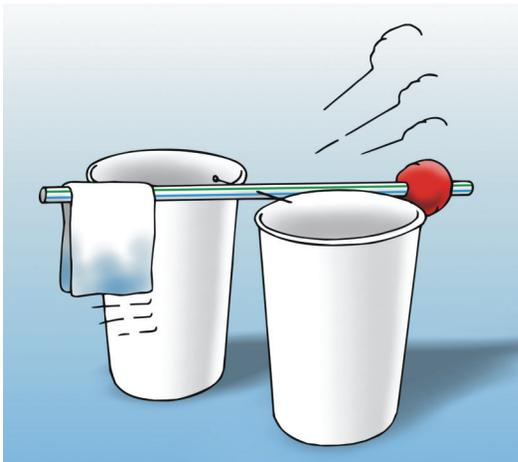
Llevados por la curiosidad podríamos preguntarnos qué ocurrirá si mojamos el suelo con agua en la que hemos disuelto azúcar. Podemos reunir a nuestros alumnos en asamblea y pedirles que hagan previsiones, empleando nuestro modelo, sobre el resultado del experimento. Tras la discusión correspondiente, una vez oídos sus comentarios, procedemos a realizar el experimento, el cual nos confirma que solamente se evapora el agua, permaneciendo el azúcar sobre la baldosa. Este resultado nos indica que los sólidos son cuerpos cuyas moléculas están unidas muy fuertemente por fuerzas de cohesión importantes. Además nos explica perfectamente el origen de las manchas. Podríamos preguntarnos si habría algún procedimiento de evaporar también el azúcar, pero dejaremos para más adelante este problema.

Con objeto de acomodar los conocimientos adquiridos, a la vez que mostramos a nuestros alumnos la posibilidad de diseñar diferentes tipos de experimentos para estudiar el mismo fenómeno, proponemos la construcción de un sencillo instrumento que nos permita, de alguna manera, pesar las moléculas. Se trata de una balanza muy elemental construida con una pajita de refrescos perforada aproximadamente en su punto medio empleando un alfiler grueso. La pajita se monta entre dos vasos, en la forma en que se indica en la figura, sujetándola con un alfiler fino, de manera que pueda bascular fácilmente.



En uno de los brazos de la balanza situamos una servilleta de papel mojada con el líquido cuyo proceso de evaporación queremos estudiar y la equilibramos por medio de un trozo de plastilina o un clip, colocado en el otro brazo de la balanza.

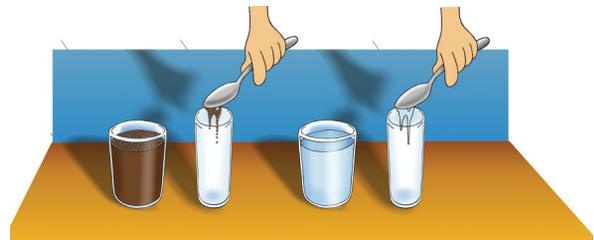
Sólo nos queda esperar y observar. Al ir transcurriendo el tiempo, el líquido de la servilleta se va evaporando y la balanza se desequilibra poco a poco, pudiéndose cuantificar la duración del proceso para diferentes líquidos.



Es evidente que el agua pasa del estado gaseoso al líquido, y viceversa, con una facilidad sorprendente y muy sencilla de observar por medio de experimentos. Por esa razón deberíamos poder explicar las propiedades físicas del líquido haciendo uso del mismo modelo que elaboramos para el caso del vapor, y ése será nuestro próximo paso. La primera diferencia fundamental entre ambos estados del agua radica en que el vapor se extiende por toda la habitación, e incluso por toda la atmósfera, y el agua en estado líquido, en cambio, permanece en el recipiente que lo contiene. Además, el agua líquida toma la forma del recipiente en el que está contenido y su volumen permanece sensiblemente constante. De nuevo aquí hemos de preguntar a nuestros alumnos de qué manera debemos modificar nuestro modelo para que explique estos hechos, en un pro-

ceso que sólo debe obedecer a las reglas de la lógica y del conocimiento intuitivo que tenemos del comportamiento de los objetos del mundo visible. Lo más lógico es pensar que las moléculas del líquido están en contacto directo unas con otras, que son redondas y que ruedan unas sobre otras; de esta manera pueden amoldarse a la forma del recipiente y, además, conservar fijo el volumen total del líquido.

Para comprobar nuestra hipótesis, aunque sea de una manera provisional, consideramos un vaso lleno de bolitas de anís del tamaño más pequeño que podamos imaginar y, a su lado, un vaso igual lleno de agua, como indica la ilustración. El vaso de la izquierda corresponde a una visión microscópica de nuestro modelo (una representación de la realidad), en tanto que el vaso de la derecha contiene el agua real; de esta manera podemos comparar el comportamiento de ambos mundos, el real y el imaginado, y podemos realizar los mismos experimentos con los contenidos de ambos vasos comprobando hasta qué punto las predicciones del modelo coinciden con los resultados del mundo real.



Este procedimiento nos es igualmente útil para definir de una manera analógica lo que se entiende por molécula. Llegamos a este concepto sin más que dividir el contenido de los dos vasos en partes cada vez más pequeñas. En el caso del modelo llegamos así a una única bolita de anís y si queremos seguir dividiendo nuestra muestra nos vemos obligados a partir la bola en trozos más pequeños, trozos que ya no serán esfé-

ricos, no podrán rodar unos sobre otros y, por lo tanto, no tendrán las características indispensables para reproducir el comportamiento real del agua. Así pues, el límite de nuestro modelo está situado en la bola de anís y chocolate. Este límite tiene que corresponder a la partícula que forma también el vapor de agua, a la que hemos llamado molécula. Así pues podemos decir que la molécula es el trozo más pequeño que se puede obtener por división, de manera que un gran número de ellas presente las mismas características que el contenido inicial del vaso. La bolita es la molécula del vaso de bolas de anís.

Está claro que el experimento de la división sucesiva en partes cada vez más pequeñas hasta llegar a la molécula no podemos realizarlo con el vaso de agua; pero justamente ésa es la utilidad de los modelos: nos permiten realizar experimentos imaginados que dan luz sobre la naturaleza de los elementos del mundo real.



ESTUDIO SEMICUANTITATIVO DE LOS
PROCESOS DE CAMBIOS DE ESTADO

Este apartado proporciona la base física del comportamiento de las moléculas de agua, cuyo conocimiento consideramos necesario para poder entender y explicar su comportamiento. Como punto de inicio hemos elegido una pregunta: ¿por qué unas veces la moléculas de agua se pegan en una superficie, condensándose, y otras se van de la superficie al aire, evaporándose? El sentido común nos dice que para que ocurra uno u otro proceso tienen que cambiar de algún modo las condiciones, y nuestra próxima tarea será la de descubrir de qué depende que el agua *prefiera* estar en forma de líquido o de gas.



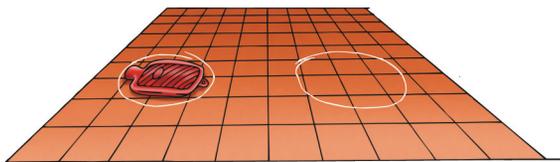
De nuevo plantearemos el problema a nuestros alumnos, pidiéndoles que traten de explicar este comportamiento o que propongan experimentos que ayuden a aclarar este extraño comportamiento. Podemos proporcionarles una pista, haciéndoles ver que las moléculas de agua se condensan sobre la superficie de un bote de refresco cuando está frío, pero no lo hacen cuando éste se encuentra a temperatura ambiente.

Sin duda nuestro lector se ha dado cuenta de que hemos llegado a un punto, en nuestro proceso constructivista, en el que se hace necesario manejar un nuevo concepto, el de *temperatura*. Aunque el niño no tiene este concepto claro, sí tiene la idea intuitiva de lo caliente y lo frío, (prescindiendo de los objetos con alta conductividad, que pueden producir sensaciones engañosas). Como todos sabemos, podemos distinguir tres niveles de conocimiento en un concepto como el de temperatura. La *idea intuitiva* que tienen todos los niños (en general con una cierta graduación que suelen expresar como helado, muy frío, frío, normal, caliente, muy caliente y tan caliente que quema), comparándolo con la temperatura de su mano; el *conocimiento operacional*, que consiste en la forma de medirla mediante el manejo de un termómetro (que no implica en absoluto que se haya adquirido el concepto correspondiente) y el *conocimiento teórico*, apoyado en un modelo: la temperatura de un gas es proporcional a la energía de sus moléculas (en el caso de un gas monoatómico es directamente proporcional a la energía cinética de las moléculas, magnitud cuyo valor es igual a la mitad del producto de su masa por el cuadrado de su velocidad). Nuestro objetivo será el conseguir que nuestros alumnos conceptualicen la nueva magnitud de la forma más completa posible, para lo cual es muy conveniente que experimenten con agua a diferentes temperaturas, de manera que relacionen sus sensaciones con la lectura del termómetro.

Como todos sabemos, un experimento es un proceso que nosotros diseñamos y llevamos a cabo en nuestro laboratorio o aula cuantas veces queramos, en el momento que deseemos y en las condiciones que elijamos, con el propósito de estudiar un proceso concreto.

Para ver el efecto de la temperatura sobre la evaporación del agua repetiremos el experimento de la evaporación sobre la baldosa, modificando las condiciones en que se lleva a cabo, siguiendo el siguiente procedimiento:

1.- Elegimos dos baldosas o zonas del suelo del aula de aproximadamente el mismo tamaño y las señalamos con un círculo de tiza. Dejamos una de las baldosas a temperatura ambiente, de manera que nos sirva de referencia en nuestro experimento y calentamos la otra zona del suelo elegida. Una forma de hacerlo consiste en colocar sobre ella una bolsa de goma con agua caliente, una manta eléctrica, etc., durante un cierto tiempo, hasta que comprobemos con la mano que la baldosa está sensiblemente más caliente que el resto.



2.- Una vez conseguido esto, repetimos el experimento que hemos hecho anteriormente, pero ahora de manera simultánea con una baldosa caliente y otra fría. Para ello, humedecemos la superficie de ambas, la caliente y la fría, con un trozo de tela muy escurrido, de la misma manera que en nuestro experimento anterior.



3.- Analizamos atentamente el proceso de evaporación sobre ambas baldosas, observando el tiempo que tardan y cuál de las dos baldosas se seca antes.



4.- Vemos que la superficie de suelo caliente se seca mucho antes. Para estar seguros de que el resultado no se debe a la casualidad, lo repetimos las veces que sea necesario para convencernos de que siempre ocurre lo mismo. También podemos realizar el experimento con platos o con azulejos sueltos, unos calientes y otros fríos, de manera que estemos seguros de que el resultado no depende de la naturaleza del objeto; en todos los casos el cuerpo caliente y el frío deben ser iguales.

Una vez realizados y discutidos estos experimentos debe quedar claro que la temperatura influye sobre el proceso del paso de líquido a vapor, produciéndose condensación a temperaturas bajas y evaporación a temperaturas altas.

Para estar completamente seguros de la corrección de nuestros resultados, nuestros alumnos deben diseñar nuevos experimentos que pongan a prueba las conclusiones, siempre provisionales, a las que hemos llegado. Como sugerencia pueden tomarse los procesos siguientes:

Sobre un vidrio caliente no se forma vaho

Si se enfría un espejo en el frigorífico y se expone a la atmósfera exterior, se forma vaho inmediatamente. Podemos limpiarlo con un pañuelo de papel y observar que se empaña de nuevo; pero si lo calentamos con el secador, el vaho desaparece y no vuelve a empañarse.

Además, estas conclusiones están de acuerdo con lo que todos hemos observado en la cocina; cuando se calienta el agua de una olla se evapora más deprisa.

El paso siguiente consiste en salir del laboratorio (que en nuestro caso es el aula) para realizar experimentos más completos, ya que hasta ahora hemos estudiado los fenómenos de evaporación y condensación de manera aislada. Para el siguiente experimento necesitamos un cuarto de baño. Con la puerta cerrada se abre el grifo de

agua caliente de la ducha y se observa lo que ocurre; aunque es algo conocido por todos, ahora lo vemos a la luz del conocimiento que hemos adquirido en nuestro laboratorio. En primer lugar nuestros alumnos deben describir lo que ocurre. Esta es una cuestión muy importante ya que de sus respuestas deduciremos los conocimientos que han adquirido y los prejuicios o pre-conceptos que pueden tener. Sus respuestas suelen contener, más o menos, la siguiente idea errónea: *el cuarto de baño se llena de un vapor que impide ver; los azulejos y el espejo se cubren con una fina capa de agua.*



A continuación analizaremos sus respuestas utilizando el modelo molecular que hemos elaborado para explicar los fenómenos que ocurren en nuestro experimento. El agua que sale de la ducha está tan caliente que las moléculas de agua de los chorros se evaporan (igual que las que estaban en la baldosa caliente) y pasan a la atmósfera. Hasta aquí todo ocurre de forma que se entiende con los conocimientos que tenemos.

Como en el aire del baño cada vez hay más moléculas de agua, es fácil que se encuentren dos y queden unidas por las fuerzas de cohesión. Si estas dos moléculas se encuentran con otro grupo y con otro... el conjunto crecerá lo suficiente hasta llegar a formar una gota de agua que es lo suficientemente grande como para que la veamos, pero lo suficientemente pequeña como para mantenerse en el aire durante un cierto tiempo (como se mantienen los granos de polvo que se hacen visibles cuando un rayo de sol penetra en una habitación oscura). Este fenómeno lo hemos visto a veces en la calle: es la niebla. Como vemos, aparece el preconcepto de llamar vapor de agua a la niebla. El vapor de agua está forma-

do por moléculas individuales y *no puede verse*, en tanto que la niebla consiste en gotas muy pequeñas de agua.*

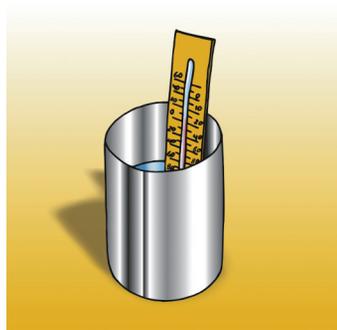
Cuando las moléculas de vapor de agua chocan con el espejo o con las paredes frías, se condensan, de la misma forma que lo hacían en la superficie del bote de refresco. Y cuando son las gotas de agua de la niebla las que chocan con las paredes, quedan adheridas, humedeciéndolas.

Para asegurarnos de que no nos hemos equivocado al suponer que lo que se forma en el baño son gotas de agua, podemos llevar a cabo una comprobación más. Emplearemos el agua que sale de un nebulizador, como el que se usa en los envases de colonia que produce gotas muy finas, o de un ambientador de los que se venden en un envase a presión, muy fáciles de utilizar. El profesor dirigirá el chorro del nebulizador hacia el haz de luz que sale de un proyector, aunque también podemos emplear un rayo de sol que penetre en el aula ligeramente oscurecida, y comprobaremos que las gotitas se mantienen en el aire de la misma manera que las que se forman en el cuarto de baño por agregación de las moléculas. Si en vez de utilizar un líquido empleamos polvo de tiza para nuestro experimento, comprobaremos cómo estas partículas de tiza se mantienen ahora suspendidas en el aire. A continuación, podemos soplar con cuidado y ver lo que ocurre. Al obligar a que el aire se mueva, las gotas de agua o el polvo de tiza se mueven también.

** Nota. En este punto debemos aclarar la diferencia entre gas y vapor. Aunque el comportamiento de gases y vapores es el mismo, se dice que una sustancia es un vapor cuando se puede condensar sin más que bajar ligeramente su temperatura, como ocurre con el vapor de agua a temperatura ambiente, es decir, cuando nos encontramos cerca de un cambio de estado. Ésta es una cuestión delicada cuando se realizan algunos experimentos ya que si alguno de los gases con los que estamos experimentando alcanza un punto en que pasa a líquido, desaparecerá de la fase gas y falseará los resultados.*

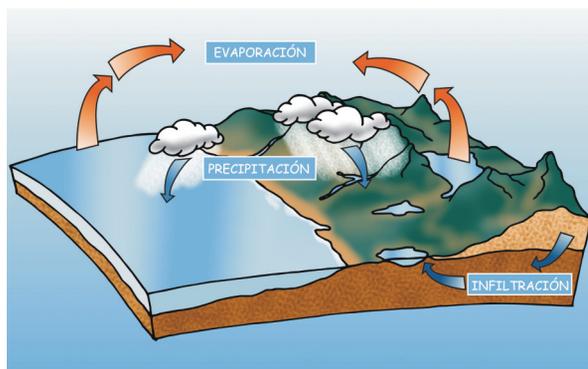
Un experimento divertido: la determinación del punto de rocío

Cuando se realizan estos experimentos en el aula, siempre hay algunos alumnos que se interesan en el doble fenómeno de la condensación y la evaporación, y en el porqué unas veces el agua se condensa sobre el bote y otras el vaho se evapora de la pared. Para aprovechar su curiosidad podemos realizar un experimento sencillo e interesante que ilustra este fenómeno. Para realizarlo dispondremos un recipiente de acero inoxidable, con la superficie pulida como un espejo (que limpiaremos cuidadosamente), y lleno hasta la mitad con agua a temperatura ambiente. Situaremos un termómetro con su bulbo sumergido en el agua, leyendo la indicación de su temperatura. En estas condiciones la superficie del recipiente aparece brillante y sin ninguna traza de vaho. A continuación vamos introduciendo lentamente pequeñas porciones de hielo, a la vez que damos vueltas al líquido con ayuda de una cuchara, como si tratásemos de disolver azúcar. Al fundirse el hielo la temperatura del líquido desciende, como podemos apreciar leyendo la indicación del termómetro. Como es evidente, llegará un momento en el que el vapor de la atmósfera comience a condensarse sobre la superficie, empañándola, lo que se aprecia perfectamente en nuestro recipiente. La temperatura a la que se inicia la condensación del vapor se denomina *punto de rocío* y está relacionada con la humedad del aire. Si producimos un aumento en la temperatura del agua el proceso se invertirá, desapareciendo el vaho.



COMPROBACIÓN DEL MODELO EN LOS PROCESOS NATURALES

En el itinerario didáctico seguido hemos comenzado por estudiar en el aula los procesos de cambio de estado entre líquido y gas de forma aislada; a continuación hemos realizado un experimento más complejo, en el que ambos fenómenos tenían lugar simultáneamente. El tercer paso de nuestro itinerario consiste en salir a la naturaleza y observar los procesos que ocurren de manera natural, intentando explicarlos con el modelo que hemos elaborado en el laboratorio. Así, cuando el profesor juzgue que han adquirido los conocimientos necesarios, deben ser capaces de resolver el problema del ciclo del agua, limitado a las formas líquida y gaseosa.

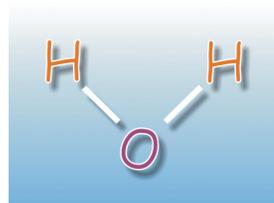


Ante todo debemos identificar los elementos esenciales que forman parte del ciclo: **el sol**, responsable del calentamiento del agua; **el agua**, protagonista del ciclo, en estado líquido formando los lagos y mares; **la atmósfera**, donde el vapor de agua se condensa y forma las nubes; y **el viento**, que lleva a estas nubes lejos de donde se forman, ya que de otra manera sólo llovería en el mar y sobre los lagos. Pero para entender el proceso debemos proporcionar dos ingredientes más a la información. El primero es el de la disminución de la temperatura de la atmósfera con la altura, que se

puede apreciar porque la temperatura de las montañas es siempre más baja que la de los valles (por eso permanece la nieve más tiempo sin derretir). Y la segunda, aunque ésta no es necesaria, consiste en la existencia de partículas de polvo en la atmósfera, que cuando están a mucha altura se encuentran a una temperatura muy baja y sobre cuya superficie se condensa el vapor (de la misma manera que lo hace sobre la del bote frío). Estas partículas de polvo reciben el nombre de centros de condensación y aceleran el proceso de la formación de gotas. Llegados a este punto, el alumno debe ser capaz de imaginarse el recorrido de una molécula de agua, inicialmente en el mar, y viajar mentalmente por el camino que la lleva a su vaso de agua y de nuevo al mar.

Un tema avanzado: el origen de las fuerzas de cohesión

Si nos fuese posible proseguir con la división del contenido del vaso de agua en partes cada vez más pequeñas, llegaríamos a la molécula de agua de manera semejante a como llegamos a la bolita de anís en el caso del vaso que contenía el *modelo*. Como todo el mundo sabe, la molécula de agua está formada por dos pequeños átomos de hidrógeno unidos a uno de oxígeno, por medio de dos enlaces llamados covalentes.

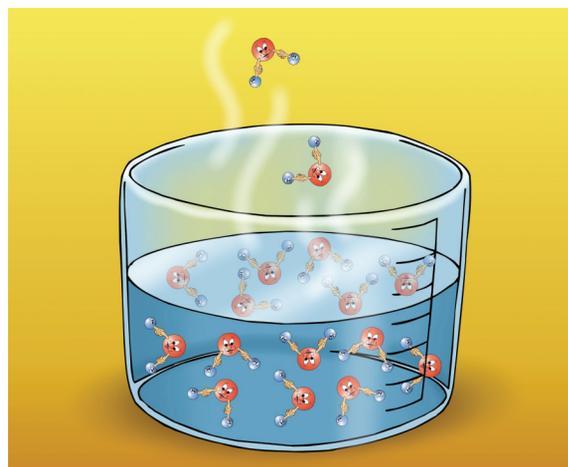


La molécula tiene un perfil en el que los alumnos suelen reconocer el de la cabeza del ratón Mickey.



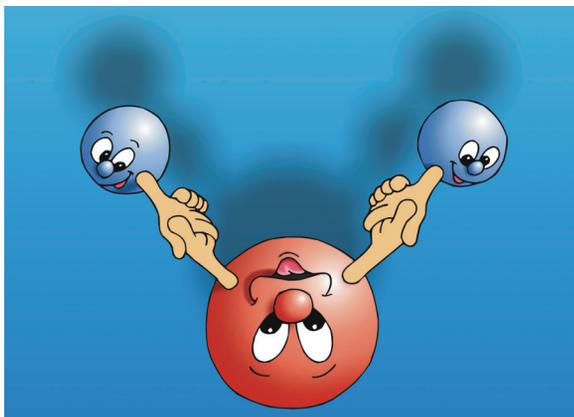
El oxígeno y el hidrógeno son completamente diferentes del agua y completamente diferentes el uno del otro. El objeto más pequeño que todavía es agua es, como hemos dicho, la molécula de agua, y toda el agua del mundo (y la de los otros planetas y de todas las galaxias) tiene la misma composición.

La razón por la que no podemos ver las moléculas es, como hemos dicho, porque su tamaño es demasiado reducido. Dieciocho gramos de agua contienen más de 600.000.000.000.000.000.000.000 moléculas. Si el número de moléculas de una gota de agua se repartiese a los habitantes de la tierra y cada uno tuviese que contar las suyas a una velocidad de una por segundo, tardaría un millón de años en hacerlo.



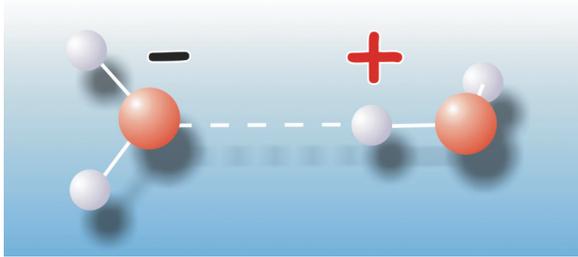
El hecho de que las moléculas que se encuentran en fase gaseosa puedan condensarse requiere, como hemos dicho, que entre ellas existan fuerzas de cohesión. Estas fuerzas son de naturaleza eléctrica y se deben a que los dos átomos de hidrógeno de cada molécula presentan una carga positiva, al contrario que el átomo de oxígeno, donde se acumula la carga negativa, de manera que aparecen en las moléculas polos eléctricos, unos positivos y otros negativos. Se dice en este caso que la molécula es *polar*. Debido a esta distribución de la carga, entre uno de los dos extremos

En realidad está constituida por los elementos hidrógeno y oxígeno: dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno, unidos por enlaces covalentes de tal manera que las direcciones de los enlaces de ambos hidrógenos forman un ángulo de unos 105° .



Si arrancamos una oreja al ratón obtendremos un átomo de hidrógeno, por un lado, y un radical OH, por otro, y si le quitamos los dos hidrógenos, el resto de la cara es un átomo de oxígeno. Pero ni el átomo de hidrógeno ni el de oxígeno se parecen en nada al agua.

positivos de una molécula y la región negativa de otra se establecen débiles fuerzas que tienden a mantenerlas unidas.



Pero este efecto, por ser tan débil, sólo tiene lugar cuando las moléculas están muy próximas entre sí y tienen poca energía, como es el caso en la fase líquida y, como veremos más adelante, en la sólida. La existencia de estas fuerzas es la causa de otra propiedad fácilmente observable: la tensión superficial, que es la responsable de que algunos insectos puedan caminar sobre la superficie del agua, y de que podamos situar en ella pequeños objetos sin que se hundan.

La existencia de estas fuerzas explica también la relación de la velocidad de evaporación del agua (número de moléculas que se evaporan en un segundo) con la temperatura. Como ya hemos dicho, aunque volveremos sobre ello más adelante, la energía cinética de las moléculas aumenta con la temperatura, por lo cual una molécula se escapa de la superficie del líquido cuando su energía es suficiente para vencer la fuerza de cohesión. También podemos explicar por qué el agua es líquida a temperatura ambiente, el nitrógeno es un gas y por qué el alcohol se evapora más rápidamente que el agua a la misma temperatura. Esto se debe a la diferente magnitud de las fuerzas de cohesión y, en último término, a la polaridad de las moléculas.

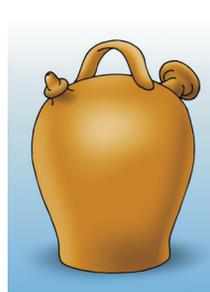
Refrigeración por evaporación

Una vez que conocemos las bases del comportamiento de la naturaleza, en este caso los cambios de estado entre líquido y vapor, este conocimiento nos permite interpretar también el fenómeno de la refrigeración

por evaporación, desde el punto de vista microscópico o molecular. Así, nos encontramos con que las partículas de un líquido o de un gas se están moviendo y agitando continuamente. Como ya hemos dicho, la temperatura es una medida de la energía cinética media de las partículas; mayor velocidad de éstas implica mayor temperatura y viceversa. En un líquido, las partículas se mueven deslizándose unas sobre otras; en la superficie libre del líquido las más veloces tienen energía suficiente para *despegarse* del resto y pueden escapar a la atmósfera, evaporándose. Este cambio de estado (de líquido a vapor) provoca un enfriamiento del sistema, ya que precisamente desaparecen las partículas que tienen mayor energía, quedando en la fase líquida las que se mueven más lentamente, es decir, las más frías.

Es muy fácil comprobar este fenómeno. Basta con mojarnos la mano con agua o alcohol y soplar sobre la parte húmeda; inmediatamente sentiremos una sensación de frío, debida a que las moléculas que se evaporan están *llevándose* la energía de la piel de nuestra mano. También se puede realizar el mismo experimento con un termómetro, sin más que humedecer el depósito de mercurio con alcohol y observar cómo desciende la indicación de la temperatura al evaporarse el alcohol.

Este proceso lo utiliza la naturaleza para refrigerar nuestro cuerpo cuando nos encontramos en un ambiente caluroso o cuando tenemos fiebre. Para que nuestra temperatura no aumente, las glándulas sudoríparas humedecen nuestra piel y, mediante la evaporación del sudor, perdemos la energía suficiente para que nuestra temperatura se mantenga en torno a los 36,6 grados centígrados.



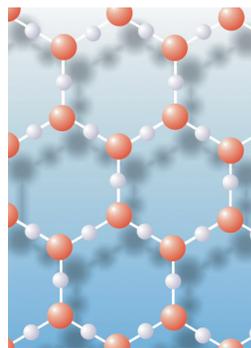
Una de las aplicaciones más conocidas de este enfriamiento por evaporación es el proceso por el que se enfría un botijo. Está fabricado con barro poroso, lo que permite que parte del agua que contiene atraviese la

pared y humedezca la superficie. Si el ambiente es seco, la evaporación provoca el descenso de su temperatura en la forma en que hemos explicado.

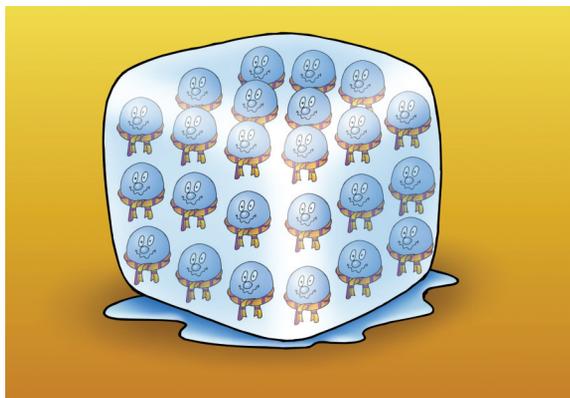
Un nuevo proceso: la solidificación

Todos sabemos que cuando la temperatura desciende por debajo de los cero grados centígrados el agua se convierte en hielo, y que este proceso recibe el nombre de *solidificación*. Debemos preguntar a nuestros alumnos cómo se puede explicar este cambio de estado con nuestro modelo de moléculas, que en el caso del líquido se comportan como bolas. Como todos conocemos el hielo, podemos tratar de hacer un resumen de las propiedades que presenta, que son las que tenemos que explicar. Las dos características más relevantes son el hecho de que mantenga la forma y su menor densidad con respecto al agua, hecho evidente ya que el hielo flota en el agua. Lo más sencillo es imaginar que las moléculas libres en la fase líquida permanecen unidas rígidamente en la sólida por no disponer de la energía suficiente para rodar unas sobre otras.

Si preguntamos a nuestros alumnos sus sugerencias siempre coinciden en señalar que las moléculas que forman el hielo tienen que estar más separadas entre sí que en estado líquido, pero no pueden ir más allá. Esta conclusión es correcta y la razón por la que ocurre está en la misma molécula. Como hemos dicho al tratar de la polaridad, los enlaces de los hidrógenos forman un ángulo de 105° , lo que hace que, al bajar la temperatura, se formen redes ordenadas. En una representación bidimensional la estructura atómica es parecida a la que indica la figura siguiente:



Para terminar diremos que el caso del agua es muy especial, lo normal es que cuando un líquido se solidifica, la fase sólida tenga una densidad superior y no flote. Esto nos proporciona una ocasión excelente para explicar a nuestros alumnos que, gracias a esta rara propiedad del agua, existe vida en la Tierra. Si no fuese por la menor densidad del hielo los lagos, mares y océanos se congelarían completamente, impidiendo el desarrollo de la vida en su seno.



Esta explicación está conforme con la rigidez del hielo, pero, de acuerdo con este sencillo modelo, un centímetro cúbico de hielo contiene el mismo número de moléculas que un centímetro cúbico de agua líquida y, por lo tanto, tiene la misma densidad. Como consecuencia nuestro modelo predice que el hielo no flota en el agua, lo que es contrario a la realidad y nos obliga a revisarlo.

RECOPIACIÓN

No dejará de sorprender al lector que, con un modelo extraordinariamente simple, podamos explicar los cambios de estado de una manera sencilla. Podemos resumir los procesos que hemos estudiado en la forma siguiente:

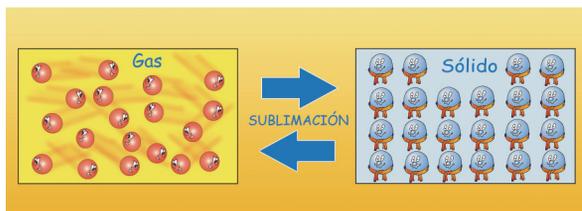
Si enfriamos el gas suficientemente lo convertimos en líquido, en un proceso que llamamos condensación y que es el inverso al de evaporación.



Si seguimos enfriando el líquido, lo que disminuye la energía de movimiento de las moléculas (energía cinética, de la palabra griega *cine*, movimiento), conseguiremos inmovilizar sus moléculas hasta el punto de producir hielo mediante el proceso de solidificación.



De una manera semejante podemos introducir el proceso de sublimación, consistente en el paso de sólido a gas.





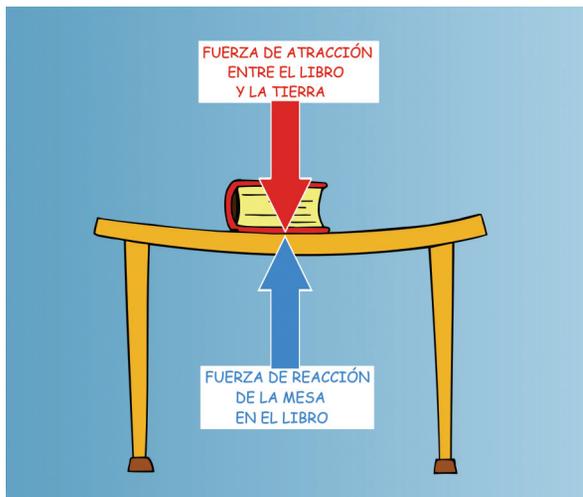
EL CONCEPTO DE
PRESIÓN



UN NUEVO CONCEPTO

La tercera ley de Newton establece que las fuerzas existen de dos en dos. De una manera formal la ley se enuncia diciendo que siempre que se aplica una fuerza, *acción*, aparece otra igual y de sentido contrario, a la que llamamos *reacción*. Aunque esta ley es de aplicación universal, en las páginas que siguen nos vamos a ocupar únicamente de los sistemas en equilibrio.

De acuerdo con esta ley, si depositamos un libro sobre una mesa el peso de éste aparecerá repartido en la superficie ocupada por el libro, provocando una deformación del tablero (como indica la figura), de la misma naturaleza que la que curva un arco cuando lo tensamos. Como resultado de esta deformación, el tablero ejercerá una fuerza elástica sobre el libro de tal manera que compensará exactamente su peso. Esta fuerza elástica constituye la reacción de la mesa, de acuerdo con lo establecido por la tercera ley de Newton.

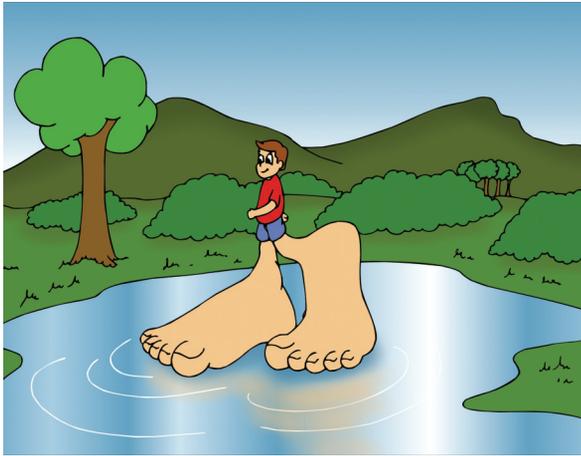


Lo mismo ocurre con el peso de los objetos que se apoyan en el suelo. El peso del cuerpo de las personas, por ejemplo, se transmite al suelo a través de la superficie de los pies, produciéndose una reacción que se materializa en una fuerza igual y de sentido contrario que el suelo ejerce, de manera que compensa el peso e impide que nos hundamos.

Si analizamos las huellas de diferentes animales vemos que, en principio, su superficie guarda una cierta proporción con el peso: los animales de mayor masa tienen huellas con mayor superficie. En algunos casos, como en el de los osos polares o los pingüinos, la superficie de sus huellas es anormalmente grande para el peso de sus dueños, y todos sabemos que esto se debe a la menor consistencia del suelo de nieve por el que se desplazan.



Si nosotros estuviésemos provistos de unos pies apropiados, podríamos caminar sobre superficies cuya capacidad de producir una fuerza de reacción fuese muy limitada. En un caso extremo, como el que indica la figura, podríamos caminar incluso sobre la superficie del agua, que sólo cuenta con las fuerzas de tensión superficial para producir la reacción al peso.



Como, afortunadamente, éste no es el caso, para caminar sobre la nieve blanda debemos emplear raquetas que aumentan el área en la que se aplica el peso de nuestro cuerpo sobre la superficie blanda de la nieve, lo que constituye un magnífico ejemplo de aplicación del conocimiento en sustitución de un largo proceso de adaptación al medio.



LA PRESIÓN EJERCIDA POR LOS SÓLIDOS

Aunque estas observaciones no son más que apreciaciones cualitativas de la realidad, nos son útiles como punto de partida en nuestro estudio del mecanismo físico que los gobierna. En todos los casos vemos que interviene el peso del cuerpo del animal y la superficie de su huella. Esto introduce un nuevo concepto que todos tenemos de manera intuitiva, pero que debemos definir cuantitativamente, que relaciona la fuerza aplicada sobre una superficie y el valor de esta superficie. Su nombre es *presión*.

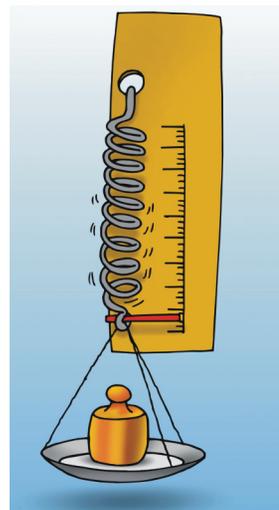
Pero antes de comenzar el estudio de la presión debemos establecer las unidades de fuerza que vamos a emplear en nuestra exposición. Tras discutir esta cuestión con los maestros que colaboran con nosotros, llegamos a la conclusión de que debemos tratar el siempre espinoso problema de las unidades de una forma más bien liberal, huyendo de los fundamentalismos de algunos puristas. Aunque el sistema internacional es obligatorio en España, nadie se expresa diciendo que pesa veinte newtons más que el verano pasado, o que sus ruedas deben inflarse a dos mil hectopascuales. Por ello, teniendo en cuenta el nivel al que nos movemos, hemos decidido no aumentar la dificultad que conlleva el adquirir un concepto nuevo con el trabajo de aprender nuevas unidades sobre cuyo valor carecemos de intuición.

Ante todo diremos que el kilogramo es una unidad de masa. Un litro de agua tiene una masa aproximada de un kilogramo, independientemente del lugar en el que se encuentre, ya sea en la superficie de la Tierra o en la de cualquier otro planeta. La masa es una propiedad intrínseca de cada objeto (la cantidad de materia), que depende de la masa de las moléculas de que está formado.

Las masas obedecen la ley de la gravitación universal, enunciada por Newton y también conocida como la ley del inverso del cuadrado, que establece que la fuerza de atracción mutua entre dos objetos de masas m_1 y m_2 es directamente proporcional al producto de ambas masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r que los separa:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

donde aparece la constante universal G , que desempeña un papel similar al del precio del kilogramo de manzanas en el ejemplo antes citado (pág. 23). Por ello nuestro litro de agua y nuestro planeta se atraerán con una fuerza gravitatoria y aparecerán sendas fuerzas atractivas en uno y otro cuerpo: en la Tierra con dirección hacia el litro de agua y en éste en dirección a la Tierra, que constituyen la acción y reacción requeridas por el tercer principio de Newton: *el peso de un cuerpo es la fuerza con que nuestro planeta atrae a ese cuerpo*.



Nosotros podemos medir esta fuerza mediante el empleo de un dinamómetro, aparato muy sencillo de fabricar que consta de un muelle o una banda de goma elástica con un extremo fijo y el otro unido al objeto que queremos pesar. El aparato se coloca con el muelle perpendicular a una fuerza de atracción, de manera que pueda determinarse el aumento de longitud del muelle o de la banda elástica provocado por la aplicación del peso. Coloquialmente decimos que el litro de agua tienen un peso de un *kilogramo fuerza*, pero la unidad del sistema internacional de fuerza es el newton, y en la superficie de la Tierra un litro de agua tiene un peso aproximado de diez newtons, con lo cual podemos calibrar nuestro dinamómetro señalando en la escala las marcas pertinentes.

Un cuerpo situado en la superficie de la Tierra se encuentra a una distancia aproximada de su centro de unos 6.400.000 metros, cuya masa es de unos $6 \cdot 10^{24}$ kilogramos. Con estos datos se obtiene en la ley de la gravitación universal un valor para G de $6,672 \times 10^{-11}$ newtons metro ²/kilogramo ².

De acuerdo con esta ley, y llamando M a la masa de la Tierra y R a su radio, un cuerpo de masa m es atraído con una fuerza:

$$F = G \frac{mM}{R^2}$$

En general se suelen separar los factores que intervienen en dos partes, en la forma en que se señala a continuación:

$$F = m \frac{GM}{R^2} = m g$$

Como una fuerza F cuando actúa sobre un cuerpo de masa m produce una aceleración, al factor g se le conoce como aceleración de la gravedad,

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

y su valor aproximado es de unos 10 metros por segundo.

Supongamos ahora que trasladamos nuestro litro de agua a la superficie de la Luna. Allí nuestro kilogramo masa pesaría solamente 1,6 newtons, dado que la masa de la Luna es mucho menor que la de la Tierra. Esta reducción de peso se hace evidente cuando vemos en la televisión la imagen de los astronautas de los años 60 y 70 desplazarse por la superficie de nuestro satélite.

En la tabla siguiente hemos indicado el peso de un cuerpo que tenga una masa de 1 kilogramo. Aunque, como hemos dicho, en la vida diaria utilizamos como medida de la fuerza el *kilogramo fuerza*, que equivale aproximadamente a diez newtons, hemos señalado también el peso en las unidades de sistema internacional. Nuestro lector debe tener en cuenta esta duplicidad en el lenguaje si quiere entender nuestro discurso:

	1 kilogramo fuerza	10 newtons
Tierra		
Luna	0,16	1,6
Mercurio	0,35	3,5
Venus	0,86	8,6
Marte	0,38	3,8
Júpiter	2,63	26,3
Saturno	1,11	11,1
Urano	1,06	10,6
Neptuno	1,41	14,1
Plutón	0,13	1,3
Sol	269,33	2.693,3

Ahora podemos volver a nuestro problema de la conceptualización de la presión, un concepto nuevo del que tenemos la idea de que aumenta cuando aumenta el peso y disminuye cuando aumenta la superficie sobre la que éste se ejerce; consecuentemente definimos la presión como la fuerza ejercida por unidad de superficie.

$$\text{presión} = \text{fuerza} / \text{superficie}$$

o, en forma simbólica,

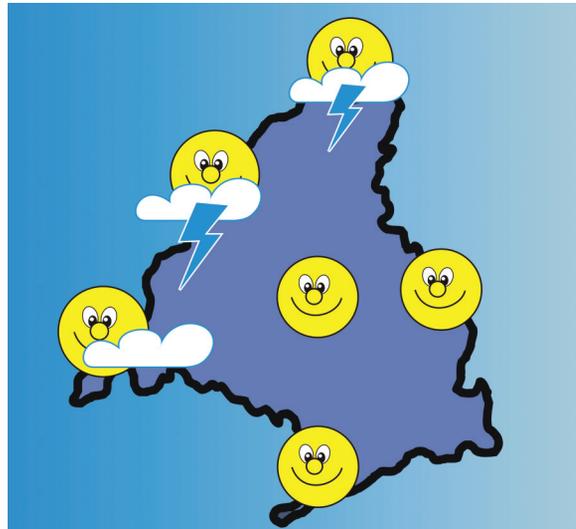
$$p = F / S$$

Sabemos que el pie humano tiene una superficie de unos 250 centímetros cuadrados y soporta un peso de unos 800 newtons o, lo que es igual, ochenta kilogramos fuerza. Cuando estamos de pie y en posición de firmes, podemos suponer que el peso del cuerpo se reparte uniformemente sobre los 500 centímetros cuadrados de apoyo, con lo cual la presión ejercida por el pie sobre el suelo es de unos 0,16 kilogramos fuerza por centímetro cuadrado, 1,6 newtons por centímetro cuadrado o 16.000 newtons por metro cuadrado. Cuando se utilizan raquetas para caminar por la nieve, con una superficie de unos 2.500 centímetros cuadrados cada una, la presión ejercida sobre el suelo disminuye haciéndose diez veces menor, suficiente para impedir que nos hundamos en la nieve.

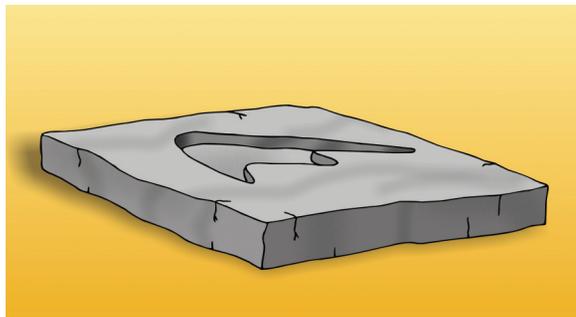
La unidad de presión en el sistema internacional es el *pascal* y corresponde a una fuerza de 1 newton por metro cuadrado. Para transformar el valor de la presión atmosférica a estas unidades debemos expresar la fuerza en newtons y el área en metros cuadrados:

Presión atmosférica = 1 kilogramo fuerza/centímetro cuadrado = 10 newtons/0,0001 metros cuadrados = 100.000 pascales/metro cuadrado = 1.000 hectopascales (del griego, *hecto* = 100)

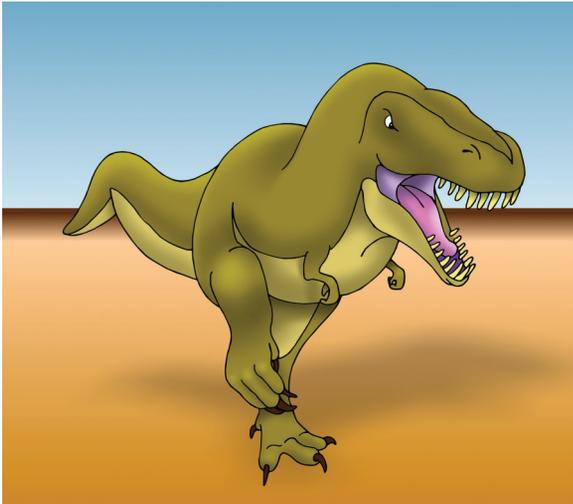
Otra unidad empleada corrientemente es el *bar* (palabra que significa peso en griego), equivalente a 100.000 pascales. Esta unidad suele ser utilizada en meteorología, por lo que todos estamos acostumbrados a ella. La presión atmosférica normal al nivel del mar es de 1.013,25 milibares (presión que coloquialmente recibe el nombre de *atmósfera*); como es evidente, el milibar corresponde exactamente al hectopascal.



Para acomodar nuestros conocimientos y darnos cuenta de la potencia que nos proporciona el simple hecho de haber definido una magnitud nueva, la presión, a la que hemos llegado desde una idea intuitiva, podemos calcular la masa de un dinosaurio por la superficie de su huella. Para ello podemos partir del valor de la presión que ejerce un elefante sobre el suelo, con una masa de unos 2.000 kilogramos y una superficie de huella de 1.250 centímetros cuadrados. El resultado es inmediato y corresponde a un valor de 0,4 kilogramos fuerza (4 newton) por centímetro cuadrado, algo más del doble de la presión que ejercen los seres humanos sobre sus pies. Si suponemos que los dinosaurios tenían unas características mecánicas similares a las del elefante podemos estimar la masa de un tiranosaurio a partir de la superficie de su huella, de unos 40.000 centímetros cuadrados.



El resultado es fácil de obtener: su masa era de unos 16.000 kilogramos.



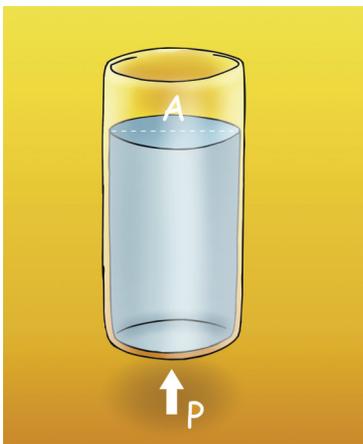
Un caso extremo de presión: los cuchillos y los clavos

64

Nuestro lector habrá imaginado, apenas ha visto este título, la razón por la que lo hemos incluido. Tanto los cuchillos como los clavos están diseñados para concentrar sobre una superficie muy pequeña una fuerza considerable, la que ejerce la mano sobre el mango del cuchillo o el martillo sobre la de la cabeza del clavo. Al aplicar esa fuerza sobre una superficie extraordinariamente reducida, el filo del cuchillo o la punta del clavo, el valor de la presión (igual al cociente de la fuerza ejercida y la superficie sobre la que se ejerce) se hace excepcionalmente elevada; como consecuencia el cuchillo o el clavo penetran en el objeto sobre el que se apoyan.

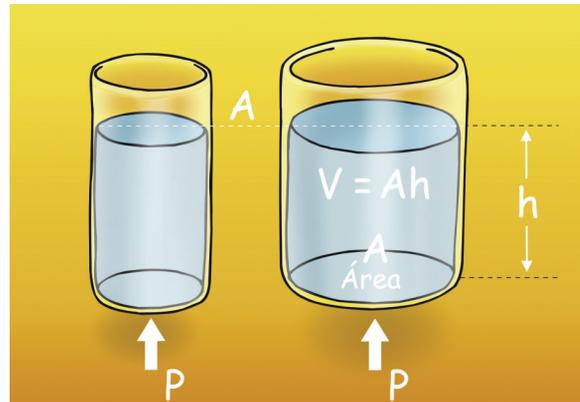
LA PRESIÓN EJERCIDA POR LOS LÍQUIDOS

La presión no solamente está producida por el peso de los sólidos. Cualquier cuerpo que pese, sea sólido, líquido o gas y esté soportado por otro cuerpo, produce una presión en la superficie de apoyo. Así, el agua de un estanque también ejerce una presión sobre el fondo y sobre las paredes. Una vez familiarizados con el concepto de presión se puede calcular esta presión fácilmente, sin más que pensar un poco y aplicar nuestros conocimientos.



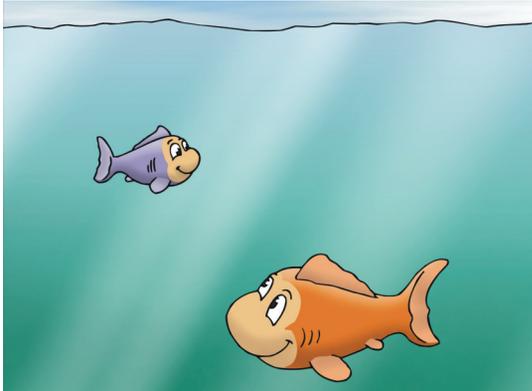
Imaginemos un vaso perfectamente cilíndrico, como el de la figura, cuya base tiene una superficie de 10 centímetros cuadrados y lleno de agua hasta una altura de un metro. El volumen de agua que contiene el vaso es de 1 litros; como la densidad del agua es aproximadamente un kilogramo por litro, el peso del agua de nuestro cilindro será de 1 kilogramos fuerza o, lo que es lo mismo, de 10 newtons. La presión que ejerce el agua sobre la superficie inferior se obtiene dividiendo su peso (la fuerza aplicada sobre el fondo), por la superficie del mismo, 10 centímetros cuadrados, es decir, 0,1 kilogramo fuerza por centímetro cuadrado.

Es importante comprender que la presión ejercida sobre el fondo no depende de la superficie de la base sino únicamente de la altura del líquido. Es muy fácil darse cuenta de esto; para ello consideramos dos vasos cilíndricos llenos de agua hasta la misma altura, pero uno de ellos con la mitad de superficie de base que el otro. Como es lógico, el peso del agua del cilindro mayor será el doble del peso del agua del pequeño, pero como la superficie del fondo es también el doble, el valor de la presión será el mismo para ambos vasos.

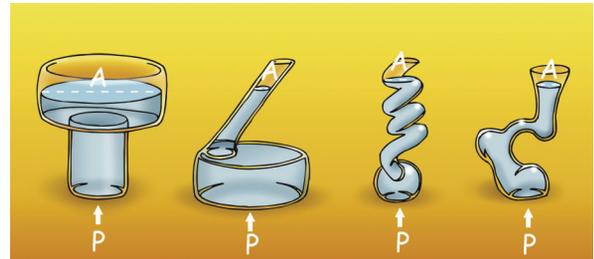


Consideremos ahora un vaso mucho más alto, de 10 metros, lleno de agua hasta el borde, y cuya base tenga 1 cm^2 de superficie. Su volumen es de 1 litro, que ejerce 1 kilogramo fuerza sobre su fondo de 1 cm^2 . Esta presión es aproximadamente igual a la presión atmosférica en el nivel del mar, lo que nos indica que una columna de agua dulce de 10 metros de altura de agua ejerce una presión de 1 atmósfera. De acuerdo con esta conclusión, cuando un pez nada a una profundidad de 10 metros en un lago situado al nivel del mar, el agua ejerce sobre él una presión de un kilogramo fuerza por centímetro cuadrado. Para obtener la presión total hay que tener en cuenta la presión atmosférica que actúa sobre la superficie del lago (que en este

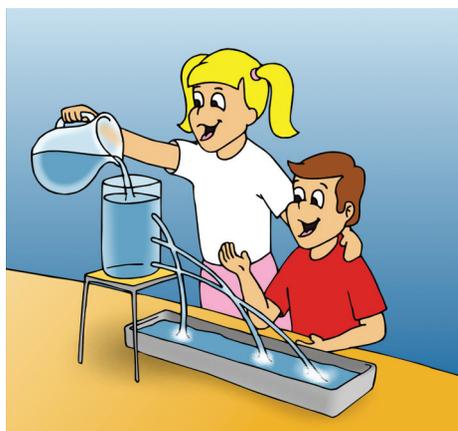
caso tiene el mismo valor), con lo cual nuestro pez está soportando una presión total de 2 kilogramos fuerza por centímetro cuadrado, es decir, dos atmósferas.



De acuerdo con estas conclusiones, la presión en el fondo de los recipientes representados en la figura es la misma, independientemente de la forma que tengan. Sólo depende de la distancia a la superficie, del valor de la aceleración de la gravedad y de la densidad del líquido.



Es fácil diseñar un experimento en el que se ponga de manifiesto esta dependencia de la presión con la altura de la columna de líquido que lo separa de la superficie. Basta con hacer tres perforaciones a diferentes alturas en una botella de plástico de dos litros, de las empleadas como envase de refrescos. Si la llenamos de agua y la mantenemos a un nivel de llenado constante por medio de un embudo y una jarra, veremos que los tres chorros de líquido que salen espontáneamente de la botella lo hacen con velocidades iniciales diferentes, trazando en el aire recorridos distintos. Estas velocidades son proporcionales a los valores de la presión a cada altura, lo que indica que la presión aumenta con la profundidad.





Segunda
Parte



DE LA GRECIA
CLÁSICA A LA
REVOLUCIÓN
CIENTÍFICA



EL NACIMIENTO DEL MODELO *ATÓMICO*

Uno de los grandes problemas que se plantearon los griegos era el de la naturaleza de las cosas, es decir, de qué estaba hecho el mundo. Es seguro que muchas personas meditaron sobre esta cuestión antes del siglo VII a.C., pero el primero que dejó testimonio escrito de sus ideas sobre este tema fue Tales de Mileto (624-548 a.C.), fundador de la escuela atomista. Pitágoras (585-500 a.C.), nacido en la isla de Samos, siguió las enseñanzas de Tales de Mileto y aplicó el atomismo a la geometría, postulando que una recta estaba formada por puntos, lo que confería al espacio una especie de estructura atómica. Para Pitágoras el espacio y el tiempo estaban *granulados*, en el sentido de que su estructura estaba formada por átomos de espacio (los puntos) e instantes indivisibles de tiempo. La existencia misma de los números enteros y fraccionarios proporcionaba una base filosófica y casi religiosa a la divisibilidad del espacio.

Entre los atomistas más famosos es obligado citar a Leucipo de Mileto (450-370 a. C.) y su discípulo Demócrito de Abdera (460-370 a. C), que establecieron las bases de lo que luego sería la teoría de los cuatro elementos. Como el concepto de átomo que tenían los atomistas griegos y los primeros científicos no coincide con el concepto moderno, cuando nos refiramos a él escribiremos la palabra en cursiva.

La primera pregunta que se plantearon los atomistas se refiere al resultado al que se llegaría si se dividiese un objeto en partes cada vez más pequeñas. Existen dos posibles respuestas: podríamos llegar a un punto en que el trozo obtenido no pueda dividirse en partes de menor tamaño (llegándose a lo que hemos llamado un *átomo*, ya que en griego la partícula *a* implica negación y *tomos* significa división); pero también podría ocurrir que nunca llegásemos a este extremo, siendo posible dividir cualquier objeto de forma indefinida, obteniendo trozos cada vez más pequeños. La forma obvia de encontrar la solución del problema es la empírica (cuya raíz etimológica es *empíria*, palabra griega que

designa lo aprehendido por observación y experimentación), es decir, llevar a cabo el proceso y observar el resultado. Pero los filósofos griegos no disponían de instrumentos suficientemente precisos para dividir los objetos y observarlos hasta tamaños tan pequeños, por lo cual nunca llegaron a ese límite. De hecho no hemos podido *ver* los átomos hasta que G. Binnig y H. Rohrer inventaron el microscopio túnel en 1981.

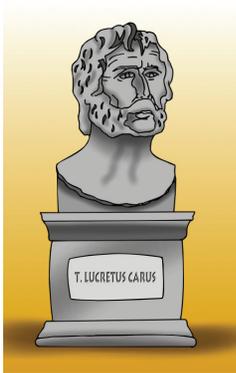
Descartada la forma empírica de comprobación de su hipótesis, únicamente queda el empleo de la lógica en la elaboración de un modelo teórico. Para ello hay que estudiar cómo está constituido el mundo que se encuentra al alcance de nuestros sentidos y descubrir las leyes que obedece, trasladando este comportamiento a un mundo microscópico que nosotros inventamos, que cumpla las mismas leyes y que explique el comportamiento de lo que observamos.

Con el pensamiento ocupado por estos problemas, se encontraba un día Leucipo sentado en lo alto de una montaña; a lo lejos, en el valle, vio un rebaño de ovejas conducido por un pastor y su perro. Desde arriba apenas se distinguían las ovejas y el rebaño parecía una gota de agua que se deslizaba suavemente por la superficie amarillenta de un pergamino. Nuestro filósofo, conocedor del inmenso poder de la imaginación, comenzó a dividir mentalmente aquel rebaño de ovejas; primero, en dos partes, luego en cuatro y así sucesivamente. Cada uno de estos conjuntos tenía la misma naturaleza que el original, es decir, era a su vez un verdadero rebaño de ovejas. Finalmente llegó a formar rebaños de una sola oveja, y ahí tuvo que detenerse. No podía dividirse más allá de ese punto sin perder la identidad del conjunto original. Había llegado al *átomo* del rebaño.

No hay que llevar las semejanzas más allá de lo razonable, pensó Leucipo. Un *átomo* de agua no puede ser divisible, como no lo es una oveja, si queremos que siga siendo oveja; los *átomos* deben responder no sólo a una idea material sino que deben ser los que conten-

gan y representen el concepto de sustancia. Por ello, como los conceptos, deben ser indivisibles e inmutables. Si no fuese así estaríamos destinados a una serie infinita de divisiones, con el correspondiente cambio de naturaleza, imposible de entender y, por lo tanto, anti-científico. Por ello introdujo una hipótesis: el *átomo* es la parte más pequeña en que puede dividirse una sustancia sin perder su identidad. Es inmutable en el tiempo y constituye el componente básico del mundo.

También podía ocurrir, pensó nuestro sabio, que en vez de un rebaño se tratase de un ejército de caballería, en cuyo caso la parte más pequeña del ejército estaría constituida por un caballo y su jinete. Pero a diferencia del caso de las ovejas, caballo y caballero tenían una entidad propia, como ocurre con el cobre y el estaño que componen el bronce. El ejército de caballería es un *material compuesto*, formado por dos tipos de *átomos*. Así pues, existen materiales simples, como el rebaño, y materiales compuestos, como el ejército de caballería y el bronce, y en todos los casos parecía razonable pensar que la operación de dividir tenía un límite. Todas las cosas estaban formadas por *átomos*.



El modelo *atómico* debería explicar también el hecho de que el mundo que nos rodea está en continua evolución, idea enunciada por Heráclito a finales del siglo VI al V a.C., y en la que algunos filósofos reconocen el antecedente de la visión filosófica de Hegel. Es, sin duda, una de las ideas más fructíferas de la filosofía natural, ya que dirige el centro

del interés del estudio de la naturaleza hacia las transformaciones que sufren las cosas y las causas que las producen, no limitándose a estudiarlas de forma estática. Heráclito introduce explícitamente el tiempo como una componente más del mundo, expresando el cambio

constante que se produce en la naturaleza en sus citas: *en los mismos ríos nos bañamos y no nos bañamos; nosotros somos y no somos nosotros, el tiempo es un río en el que no se puede bañar uno dos veces.*

Si miramos el mundo con los ojos de Heráclito nos daremos cuenta de que vivimos en un universo que cambia constantemente; los alimentos sufren transformaciones cuando se someten al calor; el cobre, que es un metal rojo, se obtiene de minerales azules o verdes, que tienen aspecto de rocas; el fuego transforma la madera en ceniza y el calor hace que el agua desaparezca en el aire. A poco que se medite sobre las transformaciones que sufren las cosas, se llega a la conclusión de que los diversos materiales que vemos y tocamos no pueden estar compuestos por sustancias totalmente diferentes (ya que se transforman unos en otros ante nuestros ojos, con aparente facilidad). Es difícil pensar que la azurita sea un material completamente distinto al cobre (que obtenemos de ese mineral). Lo más razonable es aceptar, como lo hicieron los atomistas, la existencia de un número limitado de *átomos* distintos que se combinan de diferente manera y en distinto número para producir los materiales de que está hecho el mundo. Así se explicaría, además, la existencia de categorías tan opuestas como caliente, frío, seco y húmedo, etc., que no pueden deberse al mismo tipo de *átomos*, ya que son contrarias entre sí. De esa manera la visión de Heráclito reforzó el modelo *atómico* de Leucipo y Demócrito.



LA EXISTENCIA DEL VACÍO Y LA OPOSICIÓN AL
MODELO *ATÓMICO*

Entre los detractores de esta idea se encuentran nada menos que Platón (427-347 a.C.) y Aristóteles (384-322 a.C.). A pesar de tener tan poderosos enemigos la teoría volvió a florecer con Epicuro (341-270 a.C.), el fundador del hedonismo, cuyo seguidor más famoso es el romano Tito Lucrecio Caro (96- 55 a. C), que debe su fama a ser el autor de la primera obra de divulgación científica que conoció el éxito, *De Rerun Natura (La naturaleza de las cosas)*, en la que exponía el modelo atomista de forma sencilla y atractiva.

La primera objeción a este modelo fue la de preguntarse cómo podían existir entes tan pequeños que incluso los atomistas admitiesen que no podían verse. A esto contestaron los atomistas diciendo que tampoco el aire puede verse, pero su existencia se deduce del hecho de que las hojas de los árboles se mueven porque las empuja el viento, y el viento no es más que aire que se mueve. Tampoco se ve el agua que se evapora de las ropas cuando se secan y sin embargo nos vemos obligados a admitir su existencia.

Zenón de Elea, hacia el 450 a.C., criticó la concepción *atomista* del espacio postulada desde la época de los pitagóricos empleando el método de reducción al absurdo. Son famosas sus paradojas falsídicas, llamadas así porque llega a un resultado que no sólo parece falso sino que además es falso. La más conocida de ellas es la de Aquiles y la tortuga, basada en la división en infinitas partes de la recta por la que corren ambos personajes, desde la salida hasta la línea de llegada. Muchos piensan que estas paradojas dieron lugar al desarrollo del análisis matemático, lo cual parece más que razonable.

Pero la más importante de las objeciones se estableció en torno a la existencia del vacío que es, como veremos, de trascendental importancia en la historia de la ciencia. El modelo *atómico* implica necesariamente la existencia de espacio vacío entre los *átomos*, donde éstos puedan moverse. Los atomistas la defendían apoyándose en el hecho experimental de que el aire se

puede comprimir, como se comprueba si se aprieta con las manos una vejiga de cerdo llena de aire (equivalente griego de nuestros globos). Si los *átomos* de aire estuviesen en contacto unos con otros, sin espacios vacíos entre ellos, sería imposible que al apretarlos pudiese disminuir el volumen que ocupaban.

Lo mismo ocurre con el proceso de disolución, como podemos comprobar con un sencillo experimento de fácil realización en el aula. Tomemos una botella de refresco de las de medio litro y pesémosla en un peso de cocina, anotando el resultado. A continuación la llenamos con medio litro de agua dulce, señalando con un rotulador la altura que ha alcanzado. A continuación la pesamos de nuevo, comprobando que su peso ha aumentado en 500 gramos. Seguidamente introducimos tres o cuatro cucharadas de sal en la botella y la agitamos hasta que se disuelva completamente, recuperando su transparencia original. La sal parece haber desaparecido, el nivel del agua en la botella no ha variado de forma observable pero es evidente que la sal está disuelta en el agua de la botella, como se comprueba sin más que pesarla de nuevo. Este resultado no puede explicarse si no se admite que los *átomos* de agua dejan espacios entre sí, espacios que tienen que estar vacíos y que son ocupados por los *átomos* de la sal que hemos disuelto.



MODELO DE ARISTÓTELES

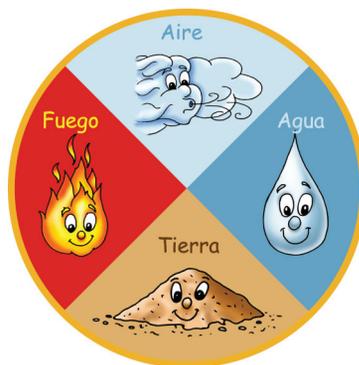
A pesar de los argumentos de los atomistas a las críticas de Aristóteles, su modelo del mundo se impuso y perduró en el pensamiento europeo hasta la revolución científica. Por ello es fundamental conocer este paradigma, al menos en lo relacionado con el modelo molecular de los gases, tema central de nuestro trabajo. La palabra paradigma en el sentido en que nosotros lo empleamos fue introducida por el físico Thomas Kuhn en los años sesenta, y define el marco intelectual formado por los conceptos con los que las personas de una determinada época ven el mundo. Kuhn describe la evolución de la ciencia como una serie de paradigmas científicos que se van sucediendo, separados por cambios importantes o revoluciones del pensamiento científico. Como veremos un poco más adelante, la revolución científica consiste en el abandono del paradigma aristotélico y su sustitución por el empírico, expresado en lenguaje matemático, propuesto por Francis Bacon e iniciado por Galileo.

Hemos dicho que el modelo *atómico* llevaba aparejado la existencia del vacío. Pero se conocían muchos fenómenos, como la ascensión de los líquidos en las bombas, que se explicaban en esa época por el *horror vacuum*, horror al vacío, cuya existencia postulaba Aristóteles y cuya falsedad tardó mucho en ser aceptada. De acuerdo con esta teoría, cuando se absorbe un refresco con una pajita el proceso tiene lugar en tres etapas. En la primera, se extrae el aire de la pajita, creando un vacío en su interior. En la segunda etapa, toda la materia que se encuentra en contacto con el espacio vacío siente una fuerza que la empuja a llenarlo, resultado del horror al vacío que siente la naturaleza. En la tercera etapa el líquido asciende por la pajita como resultado de esa fuerza.

Es muy fácil realizar en el aula experimentos de este tipo con una jeringa de lavado, las más grandes que encontremos en la farmacia, y un tubo de plástico transparente que se ajuste a su pico. Si introducimos el extremo libre del tubo en un vaso de agua y aspiramos, veremos que no aparece un espacio vacío en la parte alta de la jeringa sino que se produce una ascensión del

líquido a lo largo del tubo. Si preguntamos a nuestros alumnos la razón de este comportamiento del agua comprobaremos lo extendido que está el prejuicio del *horror vacuum* aristotélico, ya que nos dirán que el agua asciende porque la *chupa* la jeringuilla. Esta forma de ver el problema persistió hasta 1643, en que Torricelli realizó uno de los experimentos más bellos de la historia de la física. A él volveremos a lo largo de nuestro relato.

Así pues, el modelo *atómico* y la existencia asociada del vacío se abandonó a favor del modelo aristotélico de la materia continua y *horror vacuum*, única forma de explicar algo tan cotidiano como el bombeo del agua de los pozos y las minas. Debido al gran prestigio de Aristóteles y a la posterior adopción de sus teorías por los escolásticos, esta forma de pensar se mantuvo a lo largo de toda la Edad Media.



El modelo de Aristóteles se puede enunciar, de una manera resumida, en la forma siguiente:

1. El centro del universo coincide con el centro de la Tierra.
2. El universo se divide en dos partes bien diferenciadas que están separadas por la esfera de la Luna. Ambas partes están constituidas por elementos diferentes (no por diferentes tipos de *átomos*, ya que Aristóteles no los acepta) y se comportan de acuerdo a leyes distintas.
3. La Tierra y todo lo que está situado debajo de la esfera de la Luna, está constituido por cuatro elementos o esencias que, debidamente combinados,

forman todas las sustancias materiales que en ella se hallan. Estos son los cuatro elementos de Empédocles: tierra, agua, aire y fuego.



4. La naturaleza siente horror al vacío; como consecuencia, cuando se forma un espacio sin materia, aparecen fuerzas sobre los cuerpos que rodean a este espacio, que los obligan a ocuparlo. Por tanto, se niega la existencia de los *átomos*, puesto que requiere la existencia del vacío.
5. En el universo sublunar cada elemento tiene un lugar natural, donde le corresponde estar. El lugar natural del elemento tierra es una esfera cuyo centro coincide con el centro del universo (y por consiguiente con el de la Tierra). En torno a esta esfera se encuentra el lugar que le corresponde al agua. Sobre el agua se sitúa el lugar natural destinado al aire y sobre éste el sitio reservado al fuego. Todos los espacios naturales de estos elementos están separados por una superficie esférica.
6. El hecho de que en el universo sublunar exista un cierto desorden es causado por los efectos de arrastre que produce la esfera de la Luna en su movimiento. Gracias a este desorden se pueden formar mezclas de los cuatro elementos que dan lugar a los diferentes materiales que vemos en la naturaleza.

De acuerdo con este modelo, un objeto de la parte sublunar abandonado a sí mismo sentirá una fuerza que lo llevará al sector esférico correspondiente, de manera que ocupe el lugar que la naturaleza le ha asignado.

Esto explica el hecho de que las burbujas que se puedan formar en el fondo de un estanque sientan una fuerza que las empuja a atravesar la región destinada al agua y se dirijan hacia su propio lugar natural, la corona del aire. En cambio una piedra (tierra) que dejemos

caer en el aire atravesará las esferas de aire y agua y sólo parará cuando llegue al lugar que le corresponde: a la esfera de tierra.

Algunos cuerpos, como la madera o el corcho, están formados por una parte de tierra y otra parte de aire. Si la masa de tierra es mayor que la de aire, el cuerpo se hundirá cuando lo colocamos en la superficie de un estanque, pero lo hará más lentamente que si fuese solamente de tierra. Por el contrario, si la masa de aire es superior a la de tierra, el cuerpo flotará, ya que la tendencia a dirigirse a la esfera de aire es superior a la de descender a la esfera de tierra. Como el lector habrá podido apreciar, la parte de aire y tierra que constituye un cuerpo equivale, de una manera bastante aproximada, a nuestro concepto de densidad, por lo cual se entiende que el modelo aristotélico fuese de utilidad incluso para cálculos prácticos de flotación y peso específico.

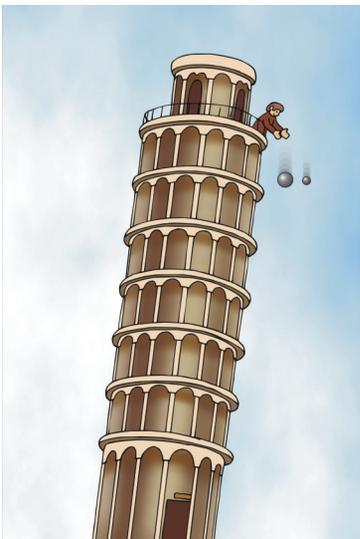
El humo, en este modelo, estaba compuesto por parte de agua, parte de aire y parte de fuego, por lo que "huía" de la esfera del agua hacia la esfera del aire y si el contenido de fuego era suficientemente elevado, incluso atravesaba la esfera del aire para dirigirse a la de fuego. Pero si perdía algo de fuego en su camino ascendente, se enfriaría y quedaría en equilibrio o descendería de nuevo a la superficie de la Tierra. En el modelo aristotélico el efecto ascensional del humo y del aire caliente (que sin duda habrían observado al estudiar las chimeneas) se debe a la cantidad de fuego que contienen, que los hace ascender por encima de la esfera del aire.

De igual manera se podía explicar el mecanismo de formación de las nubes. El fuego que desprende el Sol llega a la Tierra e incide sobre la superficie del mar, se mezcla con el agua y forma vapor de agua. Este vapor de agua, compuesto por una parte de agua con tendencia a permanecer en el mar y otra parte de fuego con tendencia a subir más allá de la esfera del aire, asciende y forma las nubes. Cuando una corriente de aire frío arrebató al vapor de agua su contenido de fuego, el agua resultante cae en forma de lluvia.

4

LAS LIMITACIONES DEL MODELO ARISTOTÉLICO

En la física de Aristóteles los cuerpos están sujetos a movimientos naturales que se producen como resultado de las fuerzas que actúan sobre los cuatro elementos que los forman. La fuerza resultante que actúa sobre un cuerpo compuesto situado en una esfera es proporcional a la diferencia entre la masa de los elementos pertenecientes a las esferas inferiores y la de elementos de esferas superiores. Por ejemplo, una bala de cañón con una masa de 20 kilogramos caería hacia la Tierra con una velocidad dos veces mayor que una bala de 10 kilogramos. Esta predicción fue la que Galileo demostró ser falsa en sus famosos experimentos de la Torre de Pisa, dejando caer bolas de metal de diferentes tamaños y comprobando, delante de sus estudiantes, que llegaban todas al suelo al mismo tiempo.



El modelo aristotélico lleva a la conclusión de que los cuatro elementos se encuentran en equilibrio cuando están en la esfera que les corresponde, sin que se ejerza ninguna fuerza sobre ellos. Así, el aire que forma la atmósfera, por el hecho de estar en su lugar natural, sobre la esfera de tierra y de agua y bajo la de fuego, *no siente ninguna fuerza que tienda a moverlo hacia arriba o hacia abajo y, como resultado, no pesa*. Esta conclusión del modelo de Aristóteles se convirtió en un prejuicio que perduró casi 2.000 años.

Esta es la implicación más importante del modelo aristotélico para nuestra historia. Aunque es evidente que el aire tiene masa, ya que cuando hace viento nos empuja y hace mover los barcos, los griegos no tenían el concepto de gravedad y, por lo tanto, *el hecho de que algo tuviese masa no implicaba que tuviese peso*. Volveremos sobre este problema, central en la revolución científica, cuando llegue el momento.

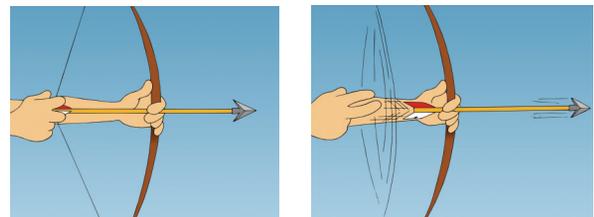
Además de los movimientos naturales, en la física de Aristóteles también existen movimientos forzados, es decir, aquéllos que van en contra de la tendencia natural de los cuerpos a permanecer quietos cuando se encuentran en la esfera que les corresponde. Estos movimientos forzados o violentos, se producen como resultado de la acción de alguna fuerza que se les aplica (de ahí el calificativo de forzados). *La velocidad de estos movimientos es proporcional, de acuerdo con Aristóteles, a la fuerza que se les aplica, lo que lleva a la conclusión de que el movimiento cesa cuando cesa la fuerza*. Esta predicción de la física aristotélica es, como demostró Galileo, contraria al resultado experimental. Así pues, de acuerdo con los postulados de la mecánica aristotélica las moléculas de un gas estarían en reposo a menos que se aplicase constantemente una fuerza sobre cada una de ellas, por lo que la visión que se tenía de un gas contenido en un recipiente era el de una masa completamente estática.

El razonamiento que hemos hecho en el caso de las moléculas es el mismo que se aplicaba para no aceptar el movimiento de la Tierra en torno al Sol. De acuerdo con Aristóteles, si se lanza una bala de cañón desde lo alto de la Torre de Pisa, la única fuerza que actúa sobre ella es la que la empuja hacia la esfera de tierra, que es una fuerza vertical dirigida hacia abajo. Si nuestro planeta estuviese animado de algún movimiento, ya sea de rotación o de traslación, la torre se habría desplazado durante el tiempo de caída de la bala y ésta caería lejos de la base de la torre, cosa que no se observa experimentalmente.

El error del razonamiento aristotélico se debe, en este caso, a la adopción de un postulado falso, la necesidad de que sobre un cuerpo se aplique una fuerza para que éste se mueva. Como estableció Galileo, un cuerpo al que no se le aplican fuerzas sigue en su estado de reposo o movimiento en que se encuentra. Cualquier niño sabe que puede jugar con un balón, haciéndolo botar en el suelo o lanzándolo al aire y recogiénolo después, tanto si está en un campo de fútbol como si se encuentra en un tren de alta velocidad que se desplaza a 300 kilómetros por hora.



Una fuerza que actúa sobre un cuerpo provoca cambios en su velocidad, es decir, aceleraciones; pero para descubrir esto fue necesario romper con una tradición de dos milenios y una forma de pensar que sustentaba todo el paradigma antiguo. De acuerdo con el modelo aristotélico, sólo son posibles los movimientos naturales o aquéllos que son el resultado de la aplicación de una fuerza. De esta manera no se explican los movimientos que se producen como resultado de un impulso inicial, como el movimiento de una flecha o una lanza. En este tipo de movimientos se aplica una fuerza a la lanza durante un tiempo corto, tras el cual la lanza recorre un espacio considerable sin estar animada, aparentemente, por ningún tipo de fuerza, contrariamente a lo estipulado por la teoría aristotélica. Para explicar este tipo de movimiento tuvo que elaborar una teoría que perduraría hasta que Torricelli demostró su falsedad, poco después de la muerte de Galileo. Aristóteles explicaba el movimiento inercial de la flecha de la manera siguiente: la flecha adquiere su movimiento forzado inicial como resultado de la fuerza ejercida por la cuerda. Inmediatamente después de que la cuerda cesa de empujar a la flecha, ésta avanza un cierto espacio. El espacio que deja detrás de ella queda vacío, el aire que lo rodea siente una fuerza que lo empuja a llenarlo y, a la vez, este aire empuja a la flecha produciendo su movimiento.



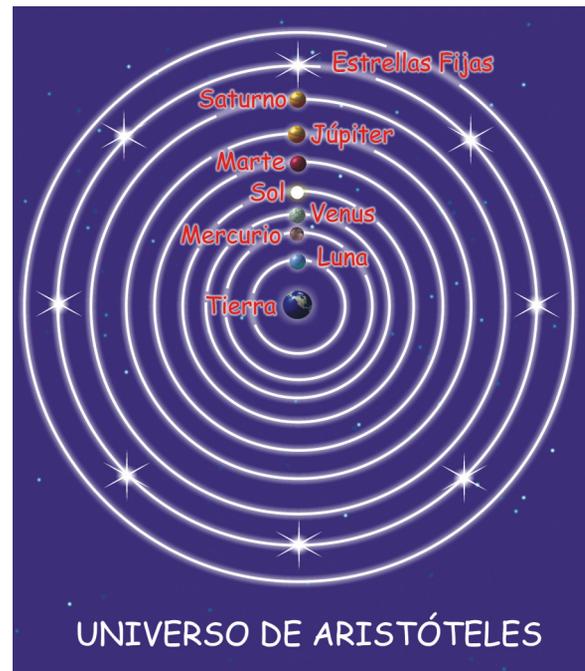
El lector se habrá dado cuenta de que el modelo de física aristotélica no explica el movimiento de la Luna, el Sol o las estrellas, por lo que tuvo que postular otra física distinta que regía más allá de la esfera de la Luna.

La parte de universo que se encuentra más allá de esta esfera es, como la platónica y al contrario que la sublunar, perfecta e inmutable. En esa parte de universo no existe ninguno de los cuatro elementos mencionados. Todos los cuerpos, que podemos llamar celestes, están constituidos por un único elemento o esencia, sin nombre específico, al que se conoce bajo la denominación de quinta esencia o quinto elemento. Esta esencia tiene la propiedad de que su movimiento natural no está dirigido hacia el centro del universo (que coincide con el centro de la Tierra). Sus cuerpos están animados de un movimiento circular, de tal manera que el centro de la circunferencia coincide con el centro del universo y es, por lo tanto, paralelo a la superficie de la Tierra. De esa sustancia estaban hechos los planetas y las estrellas así como todos los demás cuerpos que se encontraban en el espacio limitado por la esfera de la Luna.

Cada planeta (entre los que se incluía el Sol) se encuentra en una esfera que tiene su propio movimiento circular de periodo apropiado y como límite superior del universo se encuentra la esfera de las estrellas fijas. En esta esfera (transparente como las demás), se encuentran *prendidas* las estrellas como luces de un árbol de navidad, fijas en su lugar. La esfera de las estrellas fijas está animada de un movimiento de giro en torno al eje de la tierra, de manera que da una vuelta al día.

La división del universo en dos regiones que obedecen leyes diferentes no desapareció hasta que Newton enunció su ley de la gravitación universal, en 1666. Este descubrimiento ha pasado a la historia unido a la anécdota de la caída de la manzana, ya que el mismo Newton se refirió a que la razón por la que cae una manzana del árbol (la gravedad) es la misma que la responsable

de que la Luna gire en su órbita. Ocurrió durante un periodo de vacaciones forzadas, debidas a una epidemia de peste, que obligó a cerrar la universidad de Oxford.



Debemos darnos cuenta de que el modelo aristotélico sólo pretendía ordenar, de una manera general, los conocimientos que se tenían en aquella época. Se trata de una especie de marco o esquema general (un paradigma) dentro del cual se debía seguir investigando.



LA REVOLUCIÓN
CIENTÍFICA



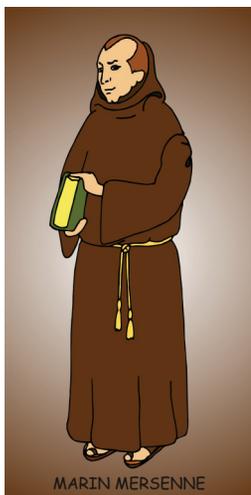
En la historia de la humanidad, los cambios de ideas, de forma de pensar, no se producen bruscamente. No obstante, se suelen situar marcadores en el tiempo con el propósito de facilitar el estudio de la evolución de las sociedades. Así, se hace coincidir el comienzo de la revolución científica con la publicación, en 1493, de la obra de Nicolaus Copérnicus, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. El efecto de este libro fue tan importante que, desde entonces, los cambios relevantes de cualquier tipo han tomado el nombre de revoluciones, precisamente del título de la obra de Copérnico.

En este capítulo presentaremos brevemente, siguiendo un itinerario histórico, los experimentos más relevantes que dieron como resultado el descubrimiento de la atmósfera, el abandono de la idea del *horror vacui*, la aceptación del peso del aire y la medida de la presión atmosférica. Nuestro objetivo es acompañar al lector en el intervalo histórico que va desde 1630, en que comenzaban a tambalearse las ideas aristotélicas en lo referente a los gases, hasta 1717, en que se habían establecido las bases de la ciencia moderna. A la vez proponemos una serie de experimentos, fáciles de realizar, que nos ayuden a revivir en el aula la emoción de aquellos años de profundo cambio.



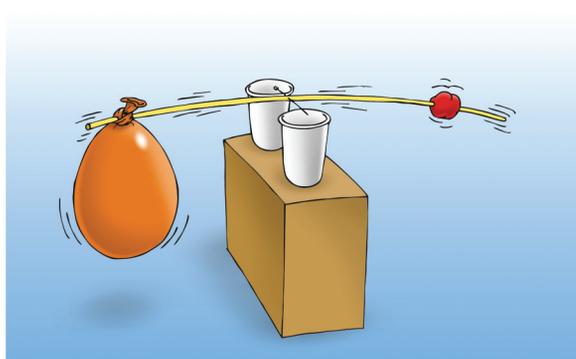
1630: JEAN REY DESCUBRE QUE EL AIRE PESA

Jean Rey había terminado medicina en la universidad de Montpellier en 1609 y, como muchos médicos de la época, era un auténtico hombre renacentista, interesado en todas las ramas del saber. Pertenecía al círculo de Amigos de Mersenne, al que comunicaba regularmente sus descubrimientos científicos, que le ocupaban una buena parte de su tiempo. En 1630, Rey publicó *Essays on the cause of the increase in weight of tin and lead when they calcinate*. Rey calentaba al aire un trozo de estaño o plomo, cuyo peso había determinado previamente. El metal, como es lógico, se oxidaba, y Rey pesaba las cenizas tan cuidadosamente como había pesado el estaño o plomo. Lo que observó le extrañó sobremanera, ya que el peso había aumentado. Según su interpretación el metal había capturado parte del aire durante el proceso de calcinación (que así se denominaba el proceso), y la diferencia de pesos correspondía a la cantidad de aire absorbida.

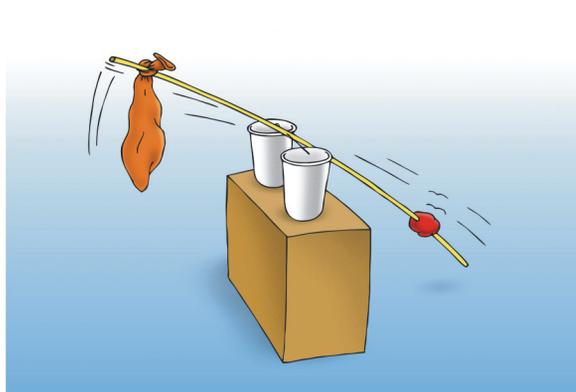


APLICACIÓN EN EL AULA

Nosotros también podemos pesar el aire, mediante un sencillo experimento fácil de realizar en el aula. Para ello basta con emplear la balanza de pajita de refresco ya descrita, empleando una de las más largas que se encuentren en el mercado. Colocamos un globo de tamaño grande en un extremo y lo equilibramos con un clip o un trozo apropiado de plastilina como indica la figura.



A continuación extraemos el aire del globo sin provocar su explosión, produciendo una perforación en la parte del cuello, muy cerca del nudo. Cuando el globo se ha vaciado por completo, veremos que la balanza se ha desequilibrado, indicando que el aire tiene un peso (del orden de un kilogramo por metro cúbico).



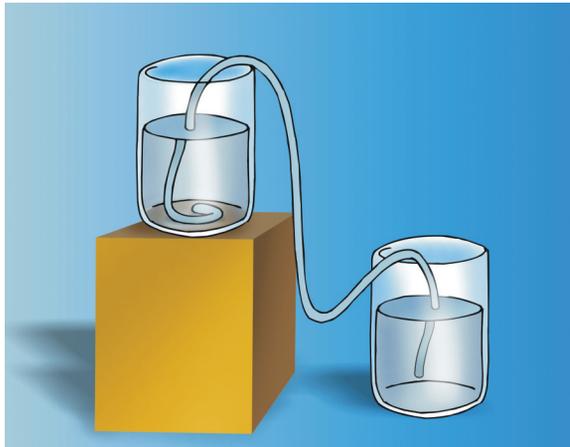
Hoy todos sabemos que la explicación de Rey era correcta, a pesar de lo cual no prosperó debido a que en aquella época se admitía la falta de peso del aire, no se conocía su composición y se pensaba que el calor era una sustancia. La aparición de Rey en nuestra historia se debe a que rompe el silencio y ataca abiertamente el modelo aristotélico en un momento en que esto era, cuando menos, arriesgado.

Ese mismo año muere Kepler y Galileo publica sus *Diálogos Sobre los dos Grandes Sistemas del Mundo*. Galileo es, probablemente, el científico que más ha influido en el desencadenamiento de la revolución científica. En España reina Felipe IV, cuya estatua ecuestre se halla en la Plaza de Oriente. Esta estatua fue diseñada por Velázquez, calculada su distribución de masas y centro de gravedad por Galileo y construida por Pedro Tacca.



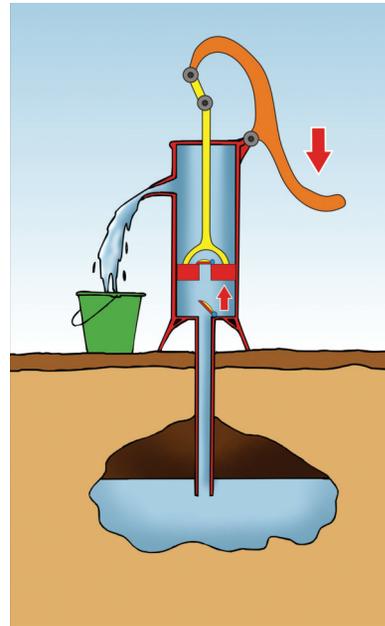
1638: GALILEO ESTIMA EL VALOR DEL
HORROR VACUI

En 1630 Giovanni Battista Baliani construyó en su finca de Génova un acueducto para regar sus tierras, utilizando una serie de sifones para salvar algunos montículos que se encontraban en su trazado. Como todo el mundo sabe, un sifón consiste en un tubo que conecta dos depósitos de líquidos al mismo o distinto nivel, como indica la figura. Una vez cebado, es decir, lleno de agua, el sifón funciona de manera que conduce el líquido desde el depósito superior al inferior.



Cuando Baliani comenzó a verter agua en el depósito superior observó que no llegaba al depósito final, no entendiéndolo dónde estaba el fallo. Como conocía a Galileo, le escribió adjuntándole los planos del acueducto y pidiéndole consejo.

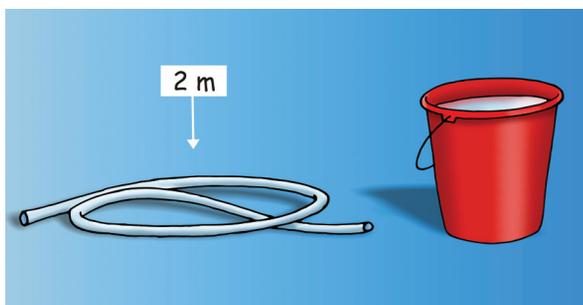
Galileo sabe que, por muy perfecta que sea una bomba de succión, no puede sobrepasar una altura de bombeo de unos diez metros. Como no sabe la razón, admite que se trata del límite de la fuerza del horror al vacío y, tras estudiar el diseño de Baliani, le contestó que el error de concepción de su acueducto estaba en la imposibilidad de salvar con un sifón una altura mayor que el límite de bombeo.



Esta explicación es de gran interés para ver la evolución del pensamiento científico, ya que está a caballo entre el aristotelismo y las teorías modernas, combinando la existencia del vacío (cosa que ningún aristotélico habría hecho), con la fuerza del *horror vacui*, cuyo límite iguala al peso de una columna de agua de unos diez metros de altura. En esta explicación no hay alusiones a causas desconocidas; introduce una fuerza que actúa de forma mecánica sobre el peso de la columna de agua. Además asocia en su análisis el límite de succión de las bombas con el límite de altura de un sifón, lo que es correcto.

APLICACIÓN EN EL AULA

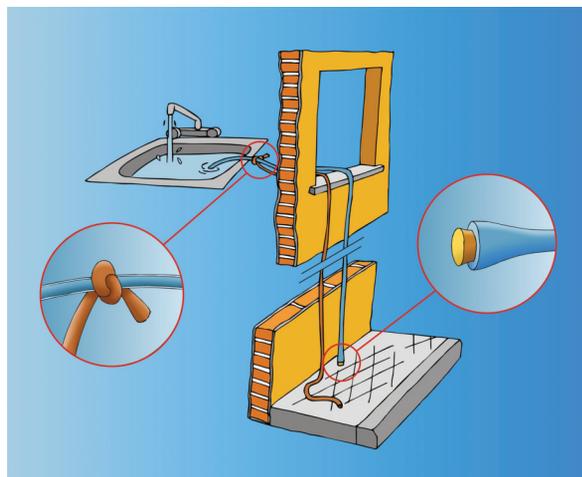
Nosotros podemos construir fácilmente un sifón de manera que nuestros alumnos observen su funcionamiento. Utilizaremos para ello un recipiente con agua, de unos cinco o diez litros, y un tubo de plástico flexible de un par de metros aproximadamente.



Colocaremos el recipiente sobre una silla o taburete de manera que esté a un metro más o menos por encima del suelo y sumergimos el tubo enrollado hasta que se llene completamente de agua. A continuación sujetamos un extremo, cuidando de que quede siempre sumergido, tapamos el otro extremo con el dedo para que no se vacíe y lo situamos fuera del recipiente a unos veinticinco centímetros por encima del nivel del suelo. Veremos cómo el agua sale por el tubo a pesar de que su parte superior esté por encima del nivel del agua.

Si queremos que nuestros alumnos observen el límite marcado por Galileo en su apreciación del *horror vacui*, tendremos que aumentar el tamaño de nuestro sifón para llegar a los diez metros de altura. Para esto utilizaremos un tubo transparente de unos veinticinco metros (la clásica manguera de PVC o similar) y un recipiente con agua en la forma indicada en la figura.

El experimento se realiza como sigue. En primer lugar colocamos el depósito de agua, que debe ser de unos diez o quince litros al menos, en el primer piso de la escuela. Se calcula el centro de la longitud de la manguera y se ata en ese punto el extremo de una cuerda de unos quince metros de longitud. Se sumerge a continuación la manguera en la pileta, convenientemente enrollada de manera que se llene completamente de agua, y se procede como en el caso del sifón pequeño. Sujetamos el extremo que queda en la pileta para que permanezca cubierto por el agua y tapamos el otro extremo con un tapón estanco o con una pinza de vacío y lo sacamos por la ventana hasta el nivel del suelo.



Una vez que llega al suelo el extremo que tiene el corcho, se destapa y, como en el caso anterior, veremos que el agua de la pileta sale por el extremo de la manguera que se encuentra a nivel más bajo. En este momento es cuando comienza nuestro experimento. Una vez que tengamos la mayor parte de la manguera fuera de la escuela, situamos a un profesor en una ventana que se encuentre en la misma vertical por la que sale la manguera y al menos cuatro pisos por encima de ésta, de manera que haya un desnivel mayor que los diez metros a que equivale el *horror vacui* de Aristóteles; este profesor estará provisto de otra cuerda que dejará caer por su ventana y a la que uniremos el extremo de la que está atada al punto medio de la manguera.



Ahora sólo queda ir subiendo la parte central del sifón y observar el momento en que deja de salir el agua por el extremo inferior. Si marcamos el punto de la cuerda en el que esto ocurre, veremos que es del orden de los diez metros, o algo menor si nos encontramos en Madrid, a unos 650 metros por encima del nivel del mar.



1640: EL EXPERIMENTO DE BERTI

Las nuevas ideas de Galileo aceptando la existencia del vacío, contenidas en la carta de 1638 a Baliani, llegaron a Roma ese mismo año, coincidiendo con la publicación de su *Discorsi in torno a due nuove scienze*. En la primera parte discute sobre el continuo, el infinito, la comprensión y enrarecimiento de los gases, así como del vacío.

Gasparo Berti tuvo conocimiento de estas nuevas ideas e invirtió el razonamiento de Galileo. Su intención era la de construir un sifón demasiado elevado para así obtener vacío, objetivo en el que estaba interesado. Junto con Rafael Magiotti diseñó un experimento cuya concepción es la misma que siguió Torricelli en el suyo, por lo cual merece que le dediquemos nuestra atención. Berti construyó un enorme tubo de vidrio de unos once metros con un depósito de unos diez litros en su parte superior y lo situó verticalmente sujeto en la fachada del convento de Minimos, en Picio. El experimento consistió en llenar completamente de agua un tubo y el depósito, mediante una válvula situada en la parte superior y un tapón en la boca inferior. A continuación, él y Rafael Magiotti introdujeron el extremo inferior en un gran recipiente que contenía agua, asegurándose de que dicho extremo estuviera siempre sumergido, y quitaron el tapón para que el agua saliese del tubo y así produjese vacío en el depósito superior, que era el objetivo del experimento. Como era de esperar, y de acuerdo con los cálculos de Galileo, sólo se vació parcialmente, quedando el tubo lleno de agua hasta una altura algo menor de diez metros y dejando sin agua el depósito superior. De acuerdo con Berti este depósito (de unos diez litros) estaba absolutamente vacío.

Los físicos aristotélicos quedaron sorprendidos por el resultado del experimento, pero no aceptaron que el depósito estuviera vacío ya que la luz lo podía atravesar, como lo demostraba el hecho de que se vieran los objetos que se encontraban detrás del depósito.

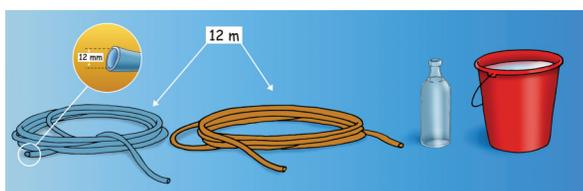


En posteriores experimentos Berti colocó una campana en el depósito supuestamente vacío, y por medio de un imán exterior se manejaba un martillo que hacía sonar la campana. Se suponía que el sonido tampoco se podía transmitir por el vacío, lo cual es cierto. Pero el sonido fue oído y los aristotélicos no quedaron convencidos. La realidad era que el famoso depósito superior no estaba vacío sino que contenía aire a una presión inferior a la atmosférica (aire que procedía del que el agua tenía disuelto), además de una cantidad importante de vapor de agua.

Los físicos de la escuela nueva quedaron convencidos de la existencia del vacío y de que era la fuerza de succión de éste la causante de que se elevase la columna de los diez metros de agua, compensando su peso. Pero los resultados de estos experimentos no fueron del todo concluyentes, por lo que los científicos se debatían entre las dos teorías. Faltaban unos años para que se dilucidase el problema.

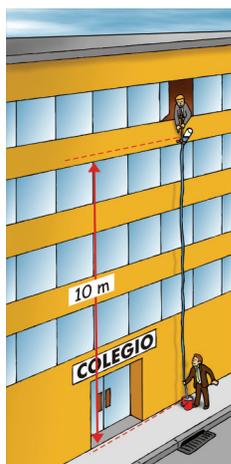
APLICACIÓN EN EL AULA

Nosotros podemos repetir el experimento de Berti en nuestra escuela de una manera fácil y divertida. Para ello necesitamos unos 12 metros de manguera transparente de PVC, semirígida, de unos 10 o 12 milímetros de diámetro interior, que puede ser la misma que utilizamos para estudiar el sifón de Baliani; un recipiente grande lleno de agua hervida o destilada en el que quepa la manguera enrollada, una cuerda de la misma longitud que la manguera y una botella de vidrio transparente que tenga un cuello que encaje en la manguera.



106

A continuación colocamos la manguera enrollada en el interior del recipiente, de manera que se llene completamente con agua hervida; llenamos también la botella y la ajustamos a uno de los extremos de la manguera. Es conveniente emplear una abrazadera en la unión entre la botella y la manguera, de manera que no entre aire y descebe el aparato.



Sujetamos ahora el extremo libre del tubo en el fondo del recipiente, de modo que este extremo quede siempre sumergido, atamos un extremo de la cuerda al cuello de la botella y lo hacemos ascender por la fachada de la escuela, como se indica en la figura. Si nos fijamos bien, veremos que el agua (que puede teñirse para que se aprecie mejor el nivel que alcanza) llena completamente la botella hasta una altura de diez metros, a partir de la cual asciende la botella pero el nivel de agua no asciende. En la botella se ha creado el espacio vacío que tanto repugnaba a Aristóteles (en realidad contiene vapor de agua).

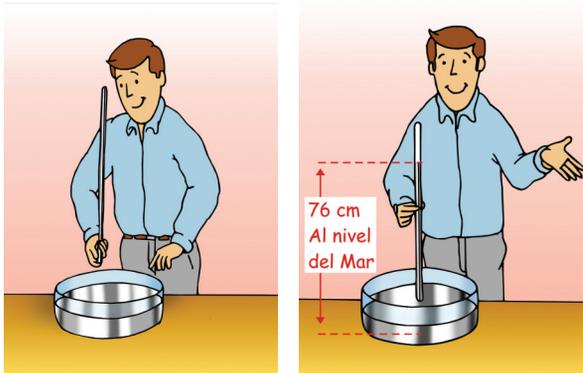
En este punto discutiremos con nuestros alumnos la relación de este experimento, realizado por Berti en 1640, con el resultado del experimento del sifón. Evidentemente ambos resultados se explicaban de la misma manera ya que marcan el límite del horror al vacío de Galileo. Con los conocimientos que tenemos en este momento no podemos dar una mejor razón del proceso.



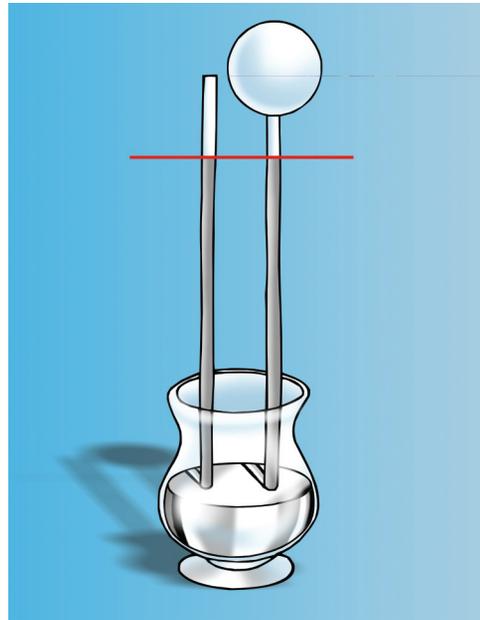
1644: EL EXPERIMENTO DE TORRICELLI

El siguiente paso lo dio Torricelli. Parece que Magiotti escribió a Torricelli explicándole el experimento de Berti empleando el modelo de Galileo, y comentándole que si se hubiese empleado agua de mar, más densa, la altura habría sido menor.

Probablemente iluminado por esta idea, Torricelli repitió el experimento de Berti en su laboratorio utilizando mercurio en vez de agua de mar. Lo realizó en los primeros meses de 1644, con la ayuda de su buen amigo Vincenzo Viviani. Como la densidad del mercurio es 13,6 veces mayor que la del agua, bastaba con un tubo 13,6 veces más corto, por lo cual Torricelli empleó uno de un metro para realizar uno de los experimentos más bellos de la ciencia.

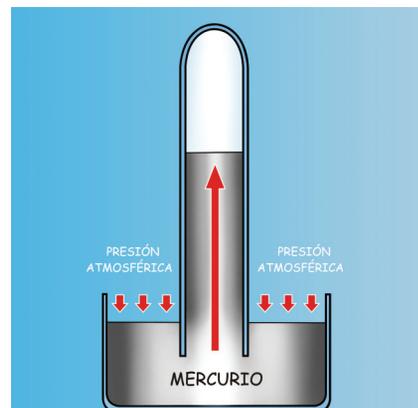


El resultado del experimento fue el que era de esperar de acuerdo con el modelo intermedio entre el aristotelismo y el nuevo paradigma que mantenía Galileo. El vacío creado en la parte superior del tubo ejercía una fuerza de succión que contrarrestaba el peso de la columna de 760 milímetros de mercurio, que pesaba igual que una de 10,336 metros llena de agua. La explicación estrictamente aristotélica se basaba en la fuerza que aparece en la superficie del mercurio y que lo empuja a llenar el vacío que se ha formado.



Esquema que aparece en una carta de Torricelli a Racci, del 11 de junio de 1664 (*Opere dei Discepoli di Galileo*, Florence, 1975).

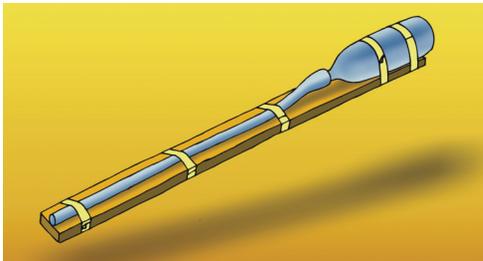
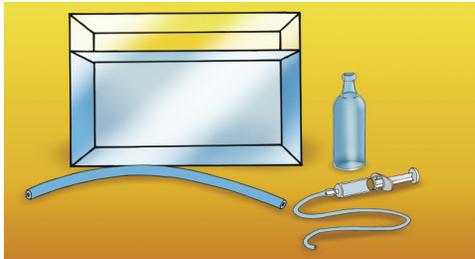
Pero Torricelli no estaba de acuerdo con este modelo. Pensaba, de acuerdo con Rey, que el aire, como todas las cosas materiales, tiene un peso, y que nosotros vivimos en la superficie de la Tierra en el fondo de un mar de aire que se extiende hacia el espacio hasta una altura no demasiado grande. El peso del aire empujaría la superficie de mercurio haciéndolo fluir hacia el interior del tubo, hasta que dicha fuerza ascensional fuese equilibrada por el peso del mercurio, de acuerdo con el esquema de la figura siguiente:



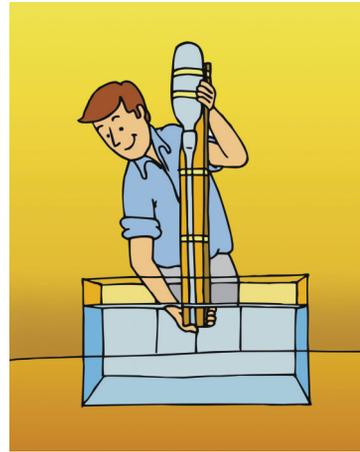
Ambas explicaciones eran igualmente satisfactorias, así que hacían falta más experimentos antes de poder decidir entre las dos teorías. Y éstos vinieron de la mano de otro gran científico, el francés Blaise Pascal, como veremos a continuación.

APLICACIÓN EN EL AULA

Nosotros no podemos repetir el experimento de Torricelli ya que no está permitido utilizar mercurio en las aulas. Pero sí podemos realizar experimentos semejantes para que nuestros alumnos adquieran los conceptos de presión atmosférica y de vacío parcial. Para ello necesitamos un metro de tubo de manguera semi-rígido, como el que ya empleamos en el experimento de Berti, con un extremo embutido en una botella de vidrio o plástico rígido, un recipiente con agua y una jeringa de las más grandes que podamos encontrar, con un tubo flexible en su extremo. Si la manguera no se mantiene en línea recta, podemos sujetarla con un trozo de madera y cinta adhesiva, de manera que se comporte como un tubo de vidrio.



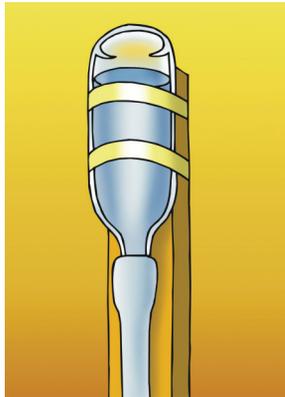
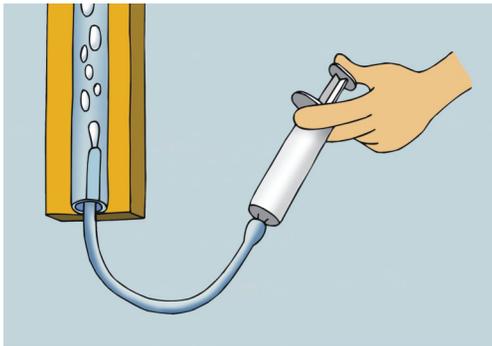
El experimento consiste en llenar de agua el tubo y la botella, tapar el extremo libre del tubo con los dedos, invertirlo e introducir dicho extremo en el recipiente. En ese punto debemos preguntar a nuestros alumnos qué esperan que ocurra cuando destapamos el tubo, y anotar las respuestas de cada uno.



Cuando destapamos el extremo sumergido no ocurre absolutamente nada, ya que la presión atmosférica es superior a la presión que ejerce la columna de agua.



A continuación, introducimos por la base de la manguera el tubo flexible unido a la jeringa, previamente llena de aire, y volvemos a preguntar qué esperamos que ocurra cuando inyectemos el aire que contiene la jeringuilla. Cuando el aire, a la presión atmosférica que se encuentra en la jeringa, entra en la manguera, lógicamente va a la parte superior dado que su densidad es del orden de mil veces más baja, haciendo que el nivel del agua descienda en la botella.

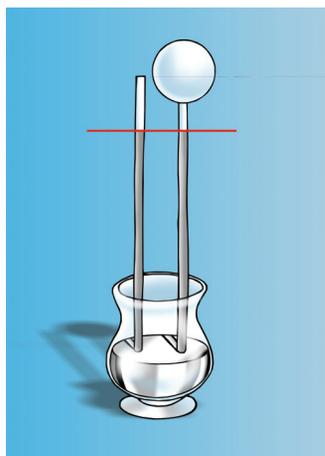




1647: EL EXPERIMENTO DE GILLES PERSONNE
DE ROBERVAL

Roberval (1602-1675) es famoso por sus trabajos matemáticos. En su época no existían los especialistas, y los filósofos naturales estudiaban todas las ciencias. También pertenecía a la tertulia de Mersenne, que se reunía periódicamente para discutir los últimos descubrimientos científicos, junto con Étienne Pascal y su hijo Blaise. En 1655 sustituyó a Gassendi en la cátedra de Matemáticas del Collège Royale en París, y compartía con Gassendi su visión atomista y mecanicista de la naturaleza.

La presencia de Roberval en nuestra historia se debe a la realización de uno de los primeros experimentos llevados a cabo en la parte del tubo de Torricelli que quedaba aparentemente en vacío. Roberval construyó un tubo de un metro de longitud con una región ensanchada en la parte superior, de manera que pudiera mantener algunos objetos pequeños.



Introdujo en ese volumen una vejiga natatoria de carpa con una pequeña cantidad de gas en su interior, llenó el tubo con mercurio y procedió a repetir el experimento de Torricelli. Ante los ojos de los espectadores, entre los que se encontraban probablemente Mersenne, Étienne y Blaise Pascal y el mismo Gassendi, la vejiga aumentó de volumen.

La finalidad del experimento era demostrar el peso del mar de aire que postulaba Torricelli, y el razonamiento de Roberval era el siguiente: todos sabemos que una vejiga llena de aire disminuye de volumen cuando se sumerge a algunos metros de profundidad en el mar, debido a que el peso de éste actúa sobre su superficie y lo comprime de la misma manera que lo haríamos con las manos. Cuando se coloca la vejiga en el tubo de Torricelli vacío, la presión exterior se anula y la interior hace que la vejiga se expanda. El hecho de que la vejiga aumente de tamaño cuando se extrae el aire del tubo en el que está situada indica sin lugar a dudas tanto que el aire tiene peso como la existencia del mar de aire que constituye la atmósfera. Este aumento de tamaño se puede explicar simplemente por la fuerza expansiva o elástica del poco gas que contiene.

APLICACIÓN EN EL AULA

Nosotros podemos repetir el experimento de Roberval en nuestras aulas, sustituyendo la vejiga de carpa por un globo aparentemente deshinchado y cerrado por medio de un nudo.



En lugar de emplear un tubo de Torricelli podemos emplear una botella de boca ancha, de las que se usan para envasar zumos de frutas, utilizando una aspiradora doméstica potente y sin fugas, con el tubo de aspiración acoplado a la boca de la botella y cerrado con cinta adhesiva ancha, o una pequeña bomba de las que se utilizan en la cocina para preparar alimentos al vacío (aunque es preferible utilizar una bomba de las llamadas rotatorias), como indica la figura. Ante nuestros ojos veremos cómo, al poner en marcha la bomba, el globo aumenta de tamaño, reproduciéndose así el resultado que maravilló a los sabios de mediados del siglo XVII.



6

1648: LOS EXPERIMENTOS DE BLAISE PASCAL

Hacia finales de 1644, en una de las reuniones que se celebraban en el laboratorio de Torricelli se realizó de nuevo el famoso experimento. A esta reunión asistió Marin Marsanne, quien tomó nota detallada y, de vuelta a París, lo comunicó a los científicos de esta ciudad, entre los que se encontraba Pascal. Éste, en compañía de Pierre Petit, repitió el experimento y lo explicó empleando el modelo de mar gaseoso, lo que implicaba la existencia del vacío y el peso del aire. Los aristotélicos le replicaron que el espacio superior del tubo estaba lleno de vapores que emanaban de los líquidos, vapores por los que podía viajar la luz, por lo que de ninguna manera había razón alguna para pensar que estaba vacío.

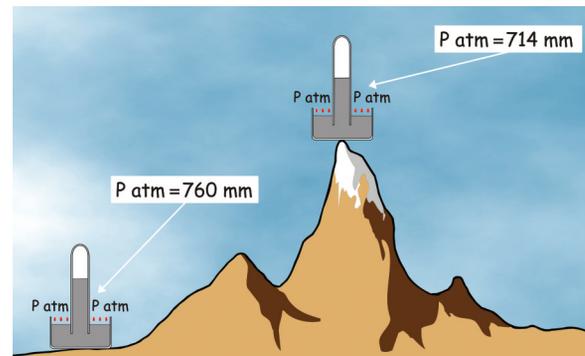
Pascal diseñó dos experimentos destinados a demostrar la existencia de la presión atmosférica. El primero, que suponemos llevó a cabo más bien como una broma, consistió en repetir el experimento de Berti con vino, que por ser más espiritoso debería desprender más vapores que el agua y, por lo tanto, llegar al equilibrio con una columna de una altura menor. Como es bien sabido, el vino es principalmente una mezcla de agua con una concentración de alcohol del 15% aproximadamente, con lo cual es menos denso que el agua pura. Por esa razón la columna de líquido subió a 11,5 metros en vez de los diez metros que medía en el caso del agua.

El segundo experimento, mucho más serio, consistió en llevar el tubo de Torricelli a lugares que se encontrasen a alturas distintas respecto del nivel de mar. Para ello requirió la ayuda de su cuñado Florin Perrier, que vivía en las inmediaciones de la montaña Puy de Dôme y que lo realizó en septiembre de 1648. Pascal razona que, si es el peso de la columna de aire sobre la cubeta de Torricelli el responsable de soportar la columna de mercurio, su altura debería ser menor en lo alto de una montaña que en la orilla del mar. Pascal pide en una carta a Perrier que repita el experimento de Torricelli al pie y en lo alto de la montaña: “*si fuesen distin-*

tas las alturas de la columna se llegaría necesariamente a la conclusión de que el peso y presión del aire son la única causa de esta suspensión del mercurio y no el horror al vacío, ya que el aire pesa más al pie de la montaña que en la cumbre de la misma, mientras que no puede decirse que la naturaleza tiene más horror al vacío al pie que en la cima de la montaña...”.

Perrier, aprovechando un día de buen tiempo, se hace acompañar de varios conciudadanos y comienza el experimento al pie de la montaña, en los jardines de un convento, donde uno de los frailes permanecería observándolo durante todo el día para controlar el valor de la presión atmosférica.

A continuación, junto a sus acompañantes, inicia la ascensión repitiendo el experimento varias veces a lo largo de la misma, observando que la altura que alcanza la columna de mercurio va disminuyendo a medida que ascienden por la montaña, siendo en la cima 85 milímetros más corta que en la base.



Los resultados obtenidos en el descenso reproducen los del ascenso, en tanto que en el jardín del convento no se había observado variación apreciable en la columna de mercurio, confirmando de esta forma las expectativas de Pascal.

Es muy sencillo calcular la profundidad del mar de aire a que se refería Torricelli y cuya existencia había comprobado Pascal. Para simplificar nuestros cálculos

vamos a suponer que el pie de la montaña Puy de Dôme se encuentra al nivel del mar. De acuerdo con las observaciones de Perrier, la altura de la montaña es de unos 1.000 metros. La altura de la columna de mercurio cuando el tubo de Torricelli se encuentra en el pie de la montaña es de 760 milímetros, habiendo descendido hasta 675 cuando se transportó a la cima. La profundidad del mar de aire es fácil de calcular, ya que sabemos que cada 85 milímetros de mercurio corresponden a la presión debida al peso del aire en una altura de 1.000 metros. Con una sencilla regla de tres vemos que si a 85 milímetros corresponden 1.000 metros, a los 760 milímetros corresponden unos 8.940 metros de aire, que sería la profundidad del mar de Torricelli. De este valor podemos deducir también la densidad del aire, pues una columna de 8.940 metros de altura y un centímetro cuadrado de superficie de base tiene que pesar justamente 1 kilogramo, valor de la presión atmosférica al nivel del mar. El volumen de esa columna es de unos 0,9 metros cúbicos, con lo cual la densidad del aire es de 1,1 kilogramos por metro cúbico, unas mil veces más baja que el agua.

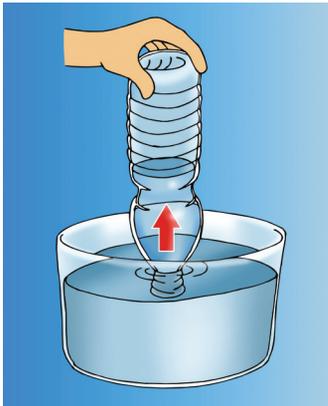
Estos cálculos los hicieron también los científicos del siglo XVII apenas conocieron los resultados de Pascal y Perrier. Los datos que obtuvieron fueron, como los nuestros, bastante aproximados, ya que el valor real de la densidad del aire al nivel del mar, a 15 grados Celsius, es de 1,3 kilogramos por metro cúbico, algo mayor que la que hemos encontrado. El error cometido, como nuestro lector habrá descubierto, ha sido suponer que la densidad del aire es constante en la atmósfera, lo cual es evidentemente falso ya que el aire se comprime fácilmente; al ir ascendiendo está sometido a un peso menor y, por lo tanto, su densidad es proporcionalmente menor. Además la temperatura también varía con la altitud, fenómeno conocido desde hace mucho tiempo, pero a pesar de ello los valores que hemos obtenido, aunque aproximados, no son descabellados.

Con el experimento del Puy de Dôme se demostró que la columna del tubo de mercurio ascendía debido a la presión atmosférica, y el instrumento se convirtió en un barómetro o medidor de presiones. Gracias a este instrumento la gente pudo saber a qué altura se encontraba sobre el nivel del mar, o a qué profundidad se encontraba cuando bajaba a una mina. La humanidad había inventado un instrumento que le permitía *ver* algo para lo que no disponía de sentido adecuado: la presión. Pascal también se dio cuenta al poco tiempo, a la vez que otros investigadores, de que el valor de la presión atmosférica a una altura fija sobre el nivel del mar no era constante. Cuando se acercaba una tormenta el barómetro descendía a la vez que bajaba la temperatura. Había nacido la meteorología, una nueva ciencia.

Por medio de los experimentos de Torricelli y Pascal hemos logrado desprendernos de los prejuicios aristotélicos y sabemos que el aire pesa como cualquier otra sustancia, que el vacío existe y se puede producir por debajo de la esfera de la Luna y que en ningún caso ejerce fuerza alguna sobre los objetos. **El vacío ni absorbe ni empuja.** Y dejamos a la curiosidad del lector explicar el funcionamiento de los sifones.

APLICACIÓN EN EL AULA

Podemos realizar un experimento para hacernos una idea del efecto de la presión atmosférica en un tubo en el que se ha hecho vacío de la manera siguiente. Calentamos una botella vacía de plástico rígido, de las empleadas para envasar bebidas con burbujas, sujeta por medio de unas pinzas apropiadas, en un recipiente con agua hirviendo que la cubra hasta un poco más de la mitad, durante un par de minutos, como indica la figura; se produce así una expansión del aire que provoca la salida de parte del mismo.





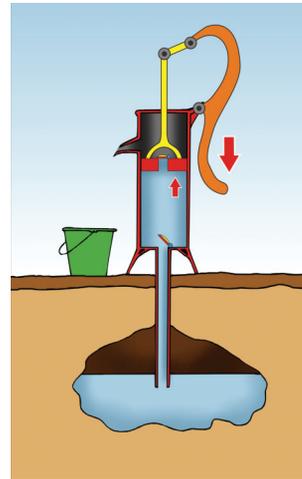
1657: EL EXPERIMENTO DE VON GUERICKE

Otto von Guericke es un ejemplo de científico del siglo XVII. Nació en 1602 en el seno de una familia perteneciente a la clase elevada de Magdeburgo; recibió una educación muy por encima de lo habitual y cursó sus estudios en la universidad de Leipzig. Más tarde, bajo la amenaza de la Guerra de los Treinta Años, se traslada a Helmstedt y después a las universidades de Jena y Leiden. Al finalizar su periodo universitario realizó un viaje de estudios por Francia e Inglaterra, como era habitual entre los hijos de familias nobles. En 1626 Otto von Guericke se establece en su ciudad natal tomando parte activa en el gobierno de la ciudad y viviendo todas las vicisitudes que hubo de soportar Magdeburgo hasta la paz de Westfalia.

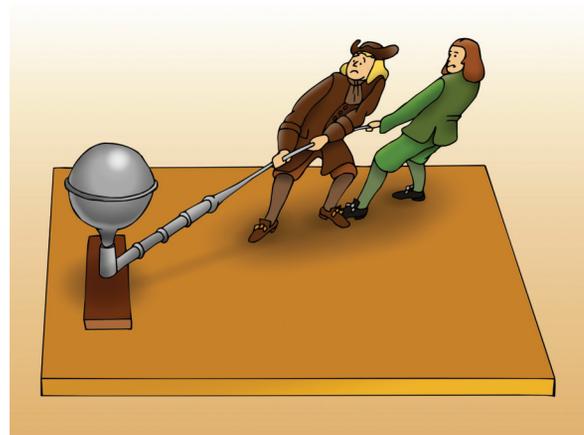


Guericke era un copernicano convencido, lo que es lo mismo que decir antiaristotélico, seguidor de Galileo y con una manera de entender el mundo fundamentalmente mecánica. No admitía como razón física la repugnancia de la naturaleza por el vacío ni su deseo de ordenación de los elementos y buscaba el conocimiento a través de observaciones cuantitativas de la naturaleza. Estas medidas proporcionan un número como resultado, que puede tratarse por medio de fórmulas matemáticas, de acuerdo con el precepto galileano.

Guericke aparece en nuestro relato por sus espectaculares contribuciones científicas. Su principal invento fue la bomba de aire, con la que consiguió evacuar diversos recintos y crear un vacío suficiente para realizar experimentos y estudiar sus propiedades. Sus bombas de aire estaban basadas en las que se empleaban desde la época de los romanos para elevar el agua de los pozos.



Guericke modificó la bomba de agua transformándola en una bomba aspirante de aire. Al principio la empleó ayudado por dos ayudantes a los que llamaba forzudos, para hacer vacío en un tonel de almacenar cerveza, probablemente de una de las fábricas de su propiedad.

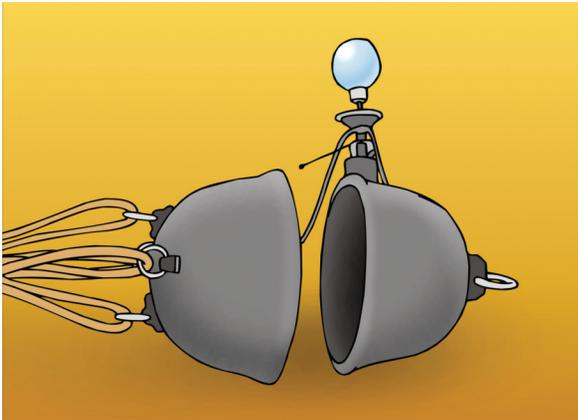


Ante el horror de los presentes, al poco tiempo de accionar la nueva bomba se produjo un enorme estruendo y el tonel quedó reducido a un montón de pez y tablas rotas. Todos quedaron sobrecogidos, Guericke les explicó que acababan de presenciar la primera implosión de la historia, ya que el tonel había sucumbido bajo la presión atmosférica. Es muy fácil calcular la fuerza que había soportado el tonel. Si

suponemos que tenía unas bases de un metro de diámetro, el valor de su superficie es fácil de calcular:

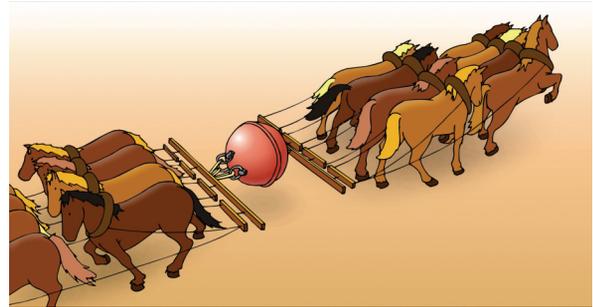
$$S = \pi r^2 = 3,14 \cdot 0,5^2 = 0,79 \text{ metros cuadrados} = 7.900 \text{ centímetros cuadrados.}$$

Como la presión atmosférica ejerce una fuerza de 1 kilogramo por centímetro cuadrado, cada una de las bases del tonel habría tenido que soportar el peso de casi ocho toneladas. Como es lógico, mucho antes de llegar a ese punto de vacío, el tonel implotó. Esto hizo que Guericke modificase su procedimiento experimental y construyese una cámara metálica capaz de soportar la presión atmosférica en su exterior y el vacío en su interior. Y mandó fundir dos semiesferas de bronce de unos 55 centímetros de diámetro, con su parte ecuatorial tan perfectamente pulidas que cerraban herméticamente introduciendo entre ellas una junta de cuero engrasada.



Otto von Guericke realizó en 1656 una representación pública en Magdeburgo consistente en evacuar el aire del interior de estas semiesferas y enganchar un tiro de seis caballos a cada una de ellas. Como nuestro lector habrá calculado mentalmente, la fuerza que deberían desarrollar estos tiros para poder separar las hemisferas es de unos 2.500 kilogramos fuerza, muy por

encima de sus posibilidades, ya que cada caballo produce una fuerza de tiro equivalente a un quince por ciento de su peso, es decir, unos 80 kilogramos fuerza por cabeza.



En 1663 Guericke repitió el experimento, con la asistencia del Elector de Brandeburgo, aumentando en este caso a una docena el número de caballos por tiro y produciendo entre los asistentes la misma admiración que en la primera representación. Su actuación terminaba con su aparición en la escena elegantemente vestido. Utilizando su bastón de alcalde de la ciudad, abría con él la llave que mantenía las semiesferas en vacío. Se producía entonces un prolongado silbido que señalaba la entrada de aire en el recinto evacuado y, finalmente, las semiesferas caían por su propio peso sin ningún esfuerzo por parte de Guericke, que explicaba a los asistentes las bases científicas del experimento.

En 1663 Otto von Guericke terminó de describir sus trabajos relacionados con el vacío en la obra *Experimenta nova Magdeburgia de vacuo spatio* (*Nuevos experimentos sobre vacío hechos en Magdeburgo*) publicada en Amsterdam en 1672 y dedicada al Elector de Brandeburgo. No recibió ningún tipo de ayuda económica, ya que habría sido un desdoro para persona tan principal como él era. Con esto quedó demostrado que el vacío podía conseguirse y, además, sin demasiado esfuerzo.

APLICACIÓN EN EL AULA

Nosotros nos podemos hacer una idea de la fuerza de la presión atmosférica por medio del experimento de la implosión del bote de refresco. Para ello necesitamos un bote vacío de un tercio de litro de capacidad que conserve la lengüeta de apertura, un infiernillo de alcohol, una cocina de gas o vitrocerámica o cualquier otra fuente de calor y un recipiente en el que pueda sumergirse al menos la mitad del bote de refresco. A continuación, se vierten dos cucharadas grandes de agua del grifo en el bote vacío de manera que el agua cubra el fondo completamente y se coloca el bote sobre la llama del mechero esperando que hierva.

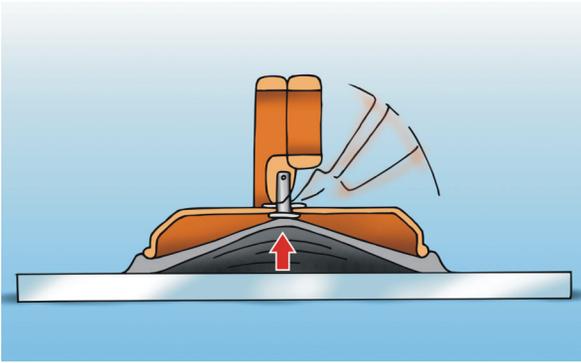


Cuando el agua del bote hierve, lo que produce la salida de una buena cantidad de vapor, se sujeta el bote por la lengüeta de vaciado empleando unos alicates suficientemente largos como para no quemarse y se sumerge boca abajo en el recipiente de agua. El resultado es espectacular, ya que el bote implota instantáneamente al igual que el tonel de Guericke, como se observa en la figura.



Nuestro lector habrá comprendido, sin duda, el proceso físico que ha tenido lugar en el bote de refresco. El vapor producido al hervir el agua se escapa por el agujero superior arrastrando el aire. A los pocos segundos de haber comenzado el proceso el aire ha sido sustituido por vapor de agua, que llena el bote completamente y no cesa de salir al exterior. En el momento en que sumergimos el bote invertido en el recipiente de agua fría, el vapor se condensa, provocando una disminución de presión en el interior del bote. El agua del recipiente tiende a llenarlo pero, debido a su viscosidad, no puede penetrar instantáneamente y la presión atmosférica que actúa en el exterior del bote hace que éste se colapse, provocando la implosión.

Como todo el mundo sabe, las ventosas que se emplean para transportar vidrios o como punta de flecha con la que juegan los niños, funcionan con este mismo principio: vacío a un lado y presión atmosférica al otro.

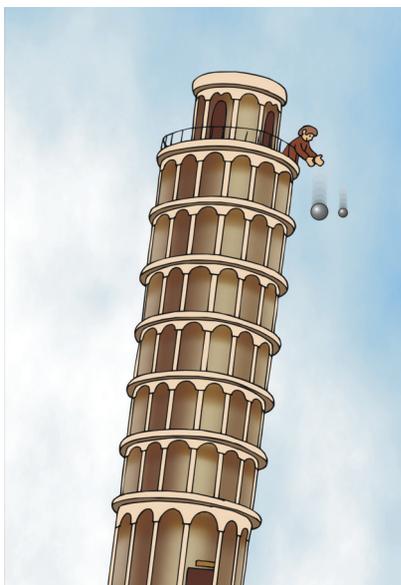




1717: EL EXPERIMENTO DE DESAGULIERS

Jean Theophile Desaguliers nació en La Rochelle en 1683, en la familia de un pastor protestante. Su padre, hugonote, huyó a Inglaterra tras la revocación del Edicto de Nantes. Estudió en Oxford, ocupando la cátedra de Filosofía experimental de Westminster en 1713 donde conoció a Isaac Newton. Formó parte de la Royal Society y en 1717 realizó el experimento que relatamos a continuación.

Como hemos dicho antes, uno de los puntos clave de la descripción aristotélica del mundo era la existencia de un lugar natural para cada uno de los cinco elementos. Como consecuencia, cuando un objeto de tierra estaba situado en la región que correspondía al aire, aparecía una fuerza que lo empujaba a ir a su lugar propio y, de acuerdo con Aristóteles, esa fuerza era proporcional a la masa del cuerpo en cuestión. Por otro lado, y como ya explicamos, la velocidad que adquiere un cuerpo en la física aristotélica es proporcional a la fuerza que actúa sobre él, por lo cual los objetos de más masa (más pesados) caerían a más velocidad que los ligeros.

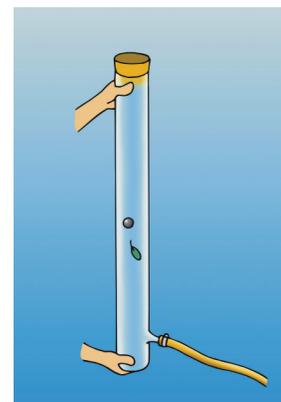


Aunque, como hemos dicho, para demostrar la falsedad de esta predicción Galileo lanzó desde lo alto de la Torre de Pisa balas de cañón de diversas masas que llegaban al suelo simultáneamente, no ocurría lo mismo con cuerpos más pequeños. Los aristotélicos se preguntaban por qué los papeles, las plumas de ave y otros objetos de pequeña masa caían con tanta lentitud como lo hacían, a lo cual Galileo contestaba que esa lentitud se debía a la resistencia que oponía el aire a su caída. Pero esta explicación no había sido nunca comprobada, quedando siempre una duda razonable sobre la explicación de la lentitud de la caída de los cuerpos ligeros.

Por esa razón Desaguliers preparó su experimento en 1717, que realizó en la Royal Society en presencia de Newton. El experimento consistió en dejar caer una pluma de ave y una moneda de oro (una guinea) en el interior de un tubo de vidrio en el que se había hecho el vacío, observándose que ambas caían prácticamente a la vez, empleando casi el mismo tiempo. El tubo de vacío, según consta en la revista de la Royal Society, *tenía una altura como de siete pies y si hubiese sido posible vaciar completamente un volumen tan grande, no habría habido diferencia alguna en el tiempo de caída.*

APLICACIÓN EN EL AULA

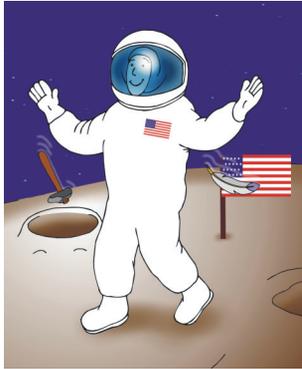
Nosotros hemos realizado el experimento de Desaguliers, aunque sin contar con una audiencia tan importante.





1969: EL EXPERIMENTO DE AMSTRONG EN LA
SUPERFICIE DE LA LUNA

El 20 de Julio de 1969 la nave Apolo 11 se posó sobre la superficie de la Luna y su comandante Neil Amstrong fue el primer ser humano que pisó su superficie. Entre los experimentos que le habían sido encargados hubo uno que le produjo una especial emoción: el



dejar caer un martillo y una pluma de ave a la vez y comprobar que llegaban a la superficie de la Luna simultáneamente. Su mente voló desde la superficie de la Luna a la Pisa del siglo XVII. A Amstrong le hubiese gustado que 336 años después de su condena, Galileo hubiese podido presenciar su experimento; sin duda habría sentido una enorme satisfacción al ver comprobada su teoría, y una no menos viva extrañeza al observar la lentitud con que ambos objetos recorrían la pequeña distancia que separaba la mano de Amstrong de la superficie lunar, y cuya razón nuestro lector habrá adivinado. Así, con este experimento de enorme valor simbólico, Amstrong rendía homenaje a una de las personas que había hecho posible adquirir los conocimientos necesarios para que el Apolo 11 realizase su viaje.

Pero no pensemos en este proceso como si se hubiese producido la derrota de Aristóteles. Sus modelos han quedado recogidos en la historia entre las más grandes aportaciones al conocimiento humano. Es uno de los gigantes sobre cuyos hombros se apoyaron los que le siguieron en el tiempo.



Tercera Parte



LA PRESIÓN QUE
EJERCEN LOS GASES



LA LEY DE BOYLE

Robert Boyle es una de las figuras claves para entender la naturaleza de los gases. Nació en 1627, quince años antes que Newton, en un castillo en el suroeste de Irlanda. Tanto Boyle como Newton se dedicaron a la ciencia en cuerpo y alma y ambos la hicieron avanzar en la forma en que sólo los genios pueden hacerlo.

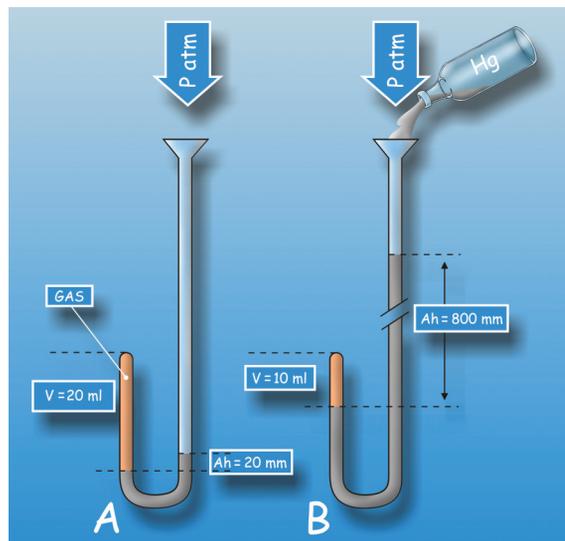


El mundo en el que vivió Boyle, coetáneo de Velázquez, fue un mundo barroco. Muy pronto dio pruebas de una mente excepcional. Durante su juventud viajó a Italia, donde leyó los trabajos de Galileo y allí se dio cuenta de la extraordinaria importancia de los experimentos para conocer la realidad. También leyó los trabajos de Descartes, adquiriendo su visión renacentista del mundo.

El experimento que nos ocupa lo realizó Boyle con ayuda de un tubo de vidrio doblado en forma de U y adosado a una escala graduada, como la que representa la figura, estudiando la compresibilidad del aire o, como él lo llamaba, la elasticidad del aire.

En estos tubos se añadía mercurio por el extremo abierto y se anotaba el volumen que ocupaba el aire comprimido en la rama cerrada. Era una operación fácil, ya que los tubos de vidrio estaban cuidadosamente contruidos de manera que su sección fuese constante. La presión a la que estaba sometido el gas del extremo cerrado era fácil de determinar, pues bastaba sumar la presión atmosférica a la longitud de la columna de mercurio. Debemos recordar que en esa época nadie utilizaba el sistema métrico decimal, introducido en la Francia de la Ilustración. Boyle empleaba la pulgada como unidad de longitud y la pulgada de mercurio como unidad de presión (una pulgada mide 2,54 centímetros).

Si variamos la presión a la que está sometido el volumen de gas, vertiendo mercurio por el extremo abierto del tubo, y anotamos el volumen ocupado por el gas, obtendremos una tabla de valores que reflejará su comportamiento.



PRESIÓN CONTRA VOLUMEN:
LEY DE BOYLE

volumen (mL)	presión (Torr)	P X V (mL Torr)
12,0	117,6	141 ₁
14,0	100,4	140 ₆
16,0	87,9	140 ₆
18,0	77,9	140 ₂
20,0	70,7	141 ₄
22,0	64,1	140 ₉

$P \propto 1/V$ (at constante n, T)
 $P_1 V_1 = P_2 V_2$ (at constante n, T)

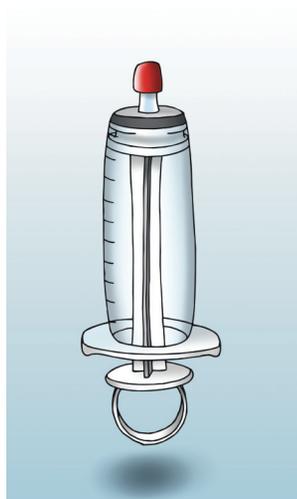
Boyle se dio cuenta inmediatamente de que, a temperatura constante, se cumple que el producto del volumen ocupado por un gas por la presión a la que está sometido se mantiene constante:

$$p \cdot V = C$$

Esta relación, publicada en 1660, se conoce como *ley de Boyle*.

APLICACIÓN EN EL AULA

Nosotros podemos realizar estos experimentos en el aula de una manera mucho más simple. Para ello necesitamos una jeringa de las que se utilizan para lavado (de 100 mililitros), un tubo que se ajuste al extremo de la jeringa o un tapón que lo cierre y unas botellas de diferentes volúmenes llenas de agua.



Si cerramos la jeringuilla con el émbolo en el centro e intentamos comprimir el aire de su interior, comprobaremos que debemos aumentar la presión que ejercemos para que el volumen de gas disminuya, de acuerdo con la ley de Boyle.

De la misma manera podemos aplicar una fuerza conocida que provoque un aumento de volumen del gas. Podemos seguir el método indicado en la figura, consistente en colgar del émbolo un peso conocido (por ejemplo el de dos litros de agua), calcular la presión (peso dividido por el área del émbolo) y anotar el volumen que ocupa el gas. Podemos repetir el proceso empleando un número diferente de botellas, hasta formar una tabla que contenga cuatro o cinco pares de valores de volumen y de presión. Si realizamos con cuidado estos experimentos descubriremos de nuevo la ley de Boyle.



Pero Boyle sabía, como nosotros, que detrás de una ley hay siempre un modelo. Y en este caso, el modelo consiste en una representación de la constitución microscópica de los gases que explique las leyes macroscópicas observadas. Boyle enunció dos posibles modelos que llevaban a este comportamiento de los gases, ambos atómicos, en el sentido en que los griegos empleaban este término. Ahora los conocemos como modelos moleculares de la materia.

El primero de los modelos de Boyle, que podríamos llamar estático molecular, consiste en postular que los gases están formados por partículas en reposo que se repelen entre sí, de forma que se comportan como mechones de lana de acero, en contacto unos con otros. Para que el gas ocupe un volumen menor (para comprimir el gas) es necesario realizar una fuerza sobre ellos, ya que espontáneamente tienden a expandirse.

Isaac Newton, unos años después de publicada la ley, elaboró su propio modelo para explicar el comportamiento que Boyle observó en los gases. Postuló que las partículas se repelían con una fuerza inversamente proporcional a la distancia que las separaba (de la misma manera que las masas gravitatorias se atraían con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia). El modelo de Newton es muy importante para los historiadores y filósofos de la ciencia, ya que es un ejemplo en el que un mal modelo explica convenientemente el comportamiento de la naturaleza en ciertas condiciones, aunque no en todas, como veremos muy pronto. Además constituye uno de los pocos casos en los que Newton se equivocó, lo que lo hace interesante en sí mismo. Aunque desgraciadamente no tenemos tiempo para desarrollarlo en esta obra, sí queremos poner de manifiesto que el modelo de Newton no implica que el aire tenga peso, por lo que pudo ser aceptado por los seguidores del aristotelismo, los cuales se apoyaban así en las ideas del mayor artífice de la revolución científica para oponerse a ella.

El segundo modelo de Boyle estaba basado en una extraña hipótesis, debida a Descartes, que consideraba la existencia de vórtices de éter, pero este modelo no logró nunca producir predicciones cuantitativas. Por esta razón y por el gran prestigio de Newton, la teoría *estático molecular* de los gases tuvo gran aceptación, permaneciendo en uso aún después de lo razonable, a pesar de la publicación de la teoría *cinético molecular* de Daniel Bernoulli en 1738, sesenta años después de descubierta la ley de Boyle. La diferencia fundamental entre las teorías estáticas y la propuesta de Bernoulli consiste en que la teoría cinética supone que las partículas que forman los gases están en movimiento constante, razón por la que se conoce como teoría cinético molecular.



1738: EL MODELO CINÉTICO DE BERNOULLI

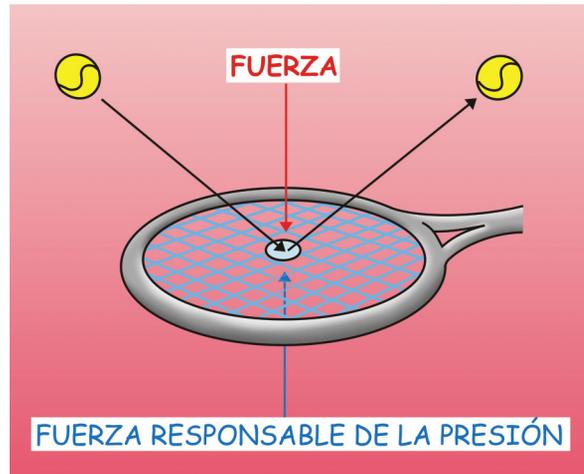
La aportación de Bernoulli al modelo molecular de la materia ilustra la importancia del trabajo teórico en la ciencia. Como hemos dicho, el modelo que se perseguía debía establecer un comportamiento bien definido de las partículas que forman el gas, de manera que de este comportamiento se dedujesen las leyes obtenidas empíricamente en el laboratorio.

El experimento de Torricelli con las comprobaciones de Pascal en Puy de Dôme había llevado a la conclusión de que nos encontrábamos en el fondo de una mar de aire y su peso era el responsable de la presión atmosférica, de la misma manera que el peso del agua de un estanque era responsable de la presión en su fondo. Pero el hecho de que en un recinto cerrado, como el extremo del tubo de Boyle, aislado de la atmósfera o en el interior de una vejiga de cerdo, el gas pudiese estar a una presión mayor que la atmosférica indicaba que la presión ejercida por un gas obedecía a otros mecanismos en los que no intervenía el peso. Bernoulli sabía, como nosotros, que la presión siempre se debía a la existencia de una fuerza que actuaba sobre una superficie, pero no podía relacionar la fuerza que se ejercía sobre la piel de la vejiga con el movimiento de las partículas que componen el gas.

Un día, estando Bernoulli paseando por San Petersburgo, vio jugar a unos niños con una pelota y una raqueta. Y se dio cuenta de que cada vez que la pelota rebotaba en la raqueta, el niño tenía que ejercer una fuerza considerable para mantener la raqueta en su posición.

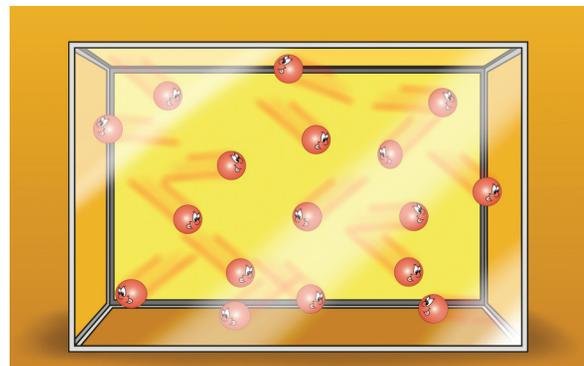


Inmediatamente se hizo la luz en su cerebro y pensó que si los gases estaban formados por partículas elásticas como la pelota, al chocar contra las paredes y rebotar debían producir una fuerza sobre ellas.

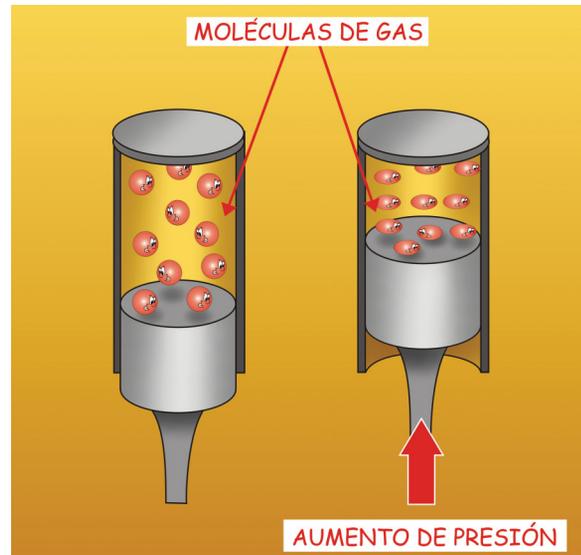
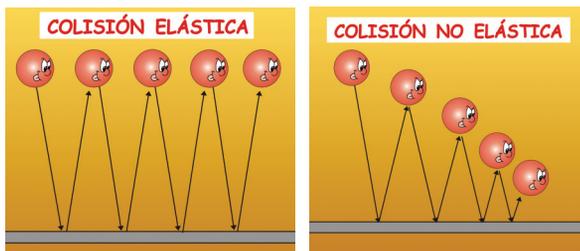


De acuerdo con esta imagen, si chocaban 1.000.000 de moléculas por segundo en un centímetro cuadrado de superficie, la fuerza que ejercerían el millón de moléculas sobre esa superficie (muy fácil de calcular) sería la responsable de la presión que el gas produce sobre las paredes, idea básica de la teoría cinética, tal como Bernoulli la presentó en 1738. Los postulados del modelo los podemos presentar, en lenguaje moderno, de la siguiente manera:

1. Un gas está constituido por un elevado número de moléculas independientes.

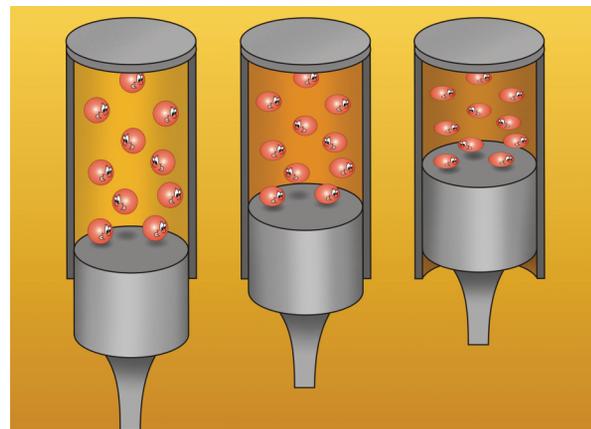


- En las concentraciones bajas en las que se puede aplicar la teoría, el diámetro de las moléculas es despreciable frente a las dimensiones del recipiente. Esto implica que la probabilidad de que una molécula encuentre a otra y choque con ella es despreciable. Las moléculas solamente chocan con las paredes. Además, el volumen que ocupan es también despreciable, con lo cual tienen a su disposición la totalidad del volumen del recipiente.



Si el volumen se reduce a la mitad la concentración pasará a valer el doble, y si se reduce a una décima parte la presión aumentará y se hará diez veces mayor. Por lo tanto, la presión, producida por el choque de las moléculas contra las paredes, aumentará de manera inversamente proporcional al volumen.

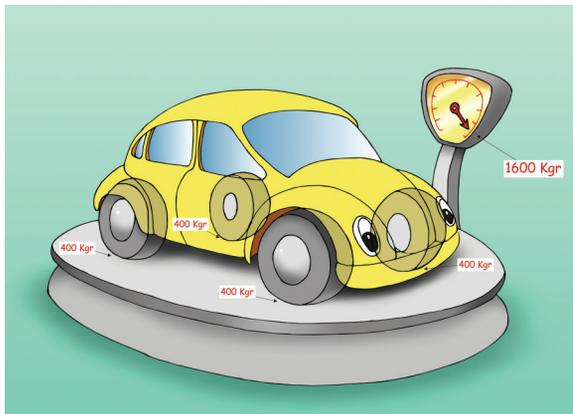
- Los choques de la molécula con las paredes son perfectamente elásticos, lo que quiere decir que el valor de la velocidad no cambia por efecto del choque (o, lo que es lo mismo, la energía y la cantidad de movimiento se conservan).
- El tiempo en el que se produce el choque es suficientemente pequeño comparado con el que discurre entre choques como para considerarlo nulo.



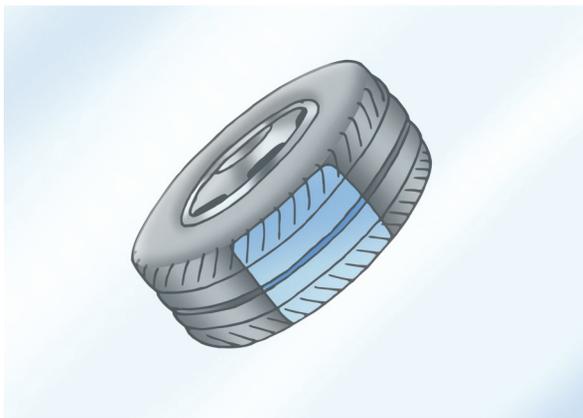
Con estos sencillos postulados podemos explicar el aumento de presión que se produce cuando disminuye el volumen. Consideremos el volumen V de una jeringuilla limitado por el interior del cilindro y la superficie del émbolo, lleno de gas; la presión P está producida, de acuerdo con el modelo de Bernoulli, por el choque de las moléculas con las paredes, como indica la figura. Es evidente que cuando disminuimos el volumen de la jeringuilla limitado por el émbolo, la concentración de partículas aumenta.

APLICACIÓN EN EL AULA

Para fijar ideas, consideremos el caso de un neumático de coche. En su interior las moléculas de aire chocan con la pared del neumático, siendo ésta la causa de que se mantenga inflado. La presión en los neumáticos modernos suele ser del orden de 2 kilogramos fuerza por centímetro cuadrado.



Si el vehículo pesa 1.600 kilogramos fuerza y su peso se reparte igualmente entre las cuatro ruedas, cada una de éstas soportará una fuerza de 400 kilogramos fuerza. Con una presión de inflado de 2 kilogramos fuerza por centímetro cuadrado se requiere una superficie de contacto con el suelo de 200 centímetros cuadrados.

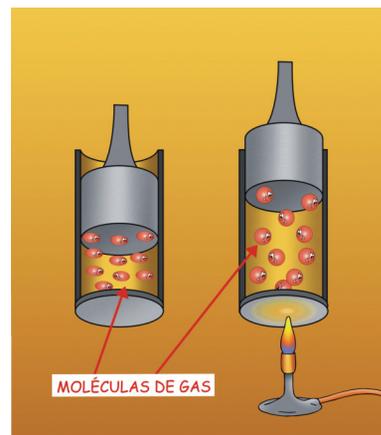


Si suponemos que cada neumático tiene una anchura de 20 centímetros, la longitud de la huella será de 120 centímetros.

Supongamos ahora que se acomodan cuatro personas con sus bártulos para emprender un viaje, con el peso total de personas y bultos de cuatrocientos kilogramos fuerza. Este peso extra se debe repartir entre las cuatro ruedas, con lo cual cada una de ellas va a soportar cien kilogramos fuerza más, lo que requiere una superficie de contacto extra de 25 centímetros cuadrados. Como la anchura del neumático no cambia, la longitud de la huella habrá aumentado hasta 11,25 centímetros.

El efecto de la temperatura en los gases

Volvamos ahora a nuestro modelo. ¿Qué ocurre cuando aumenta la temperatura del gas? De acuerdo con Bernoulli, si se comunica energía calorífica al gas, las moléculas (monoatómicas) la convierten en energía de traslación, es decir, en energía cinética. Su velocidad aumenta y el número de choques que se producen con las paredes aumenta igualmente, quedando así explicado el efecto de la temperatura sobre el valor de la presión que ejerce el gas.



Si la presión exterior se mantiene constante, el aumento de presión hace que el volumen aumente.



ENERGÍA, CALOR Y
TEMPERATURA



1654: EL TERMOSCOPIO DE GALILEO

De nuevo debemos retroceder en el tiempo, desde la Inglaterra de 1717 hasta la Toscana de 1654, unos pocos años después de la muerte de Galileo. Ya hemos dicho al comienzo de este libro que la historia no se desarrolla como el programa de un curso, de una forma ordenada, sino a base de caminos diferentes que a veces convergen, como es el caso que nos ocupa.

La historia del termómetro es una de las más interesantes en sí misma, ya que se refiere a la medida de una magnitud de naturaleza desconocida para sus inventores. Como veremos, la diferencia entre calor y temperatura tardó mucho en esclarecerse.

Se sabe que entre los aparatos de laboratorio de Galileo había varios termoscopios florentinos, cuyo esquema se ha representado en la figura siguiente:

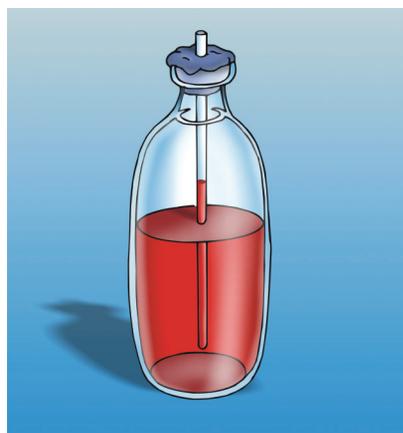


Como puede verse, el termoscopio consiste en un recipiente de vidrio lleno de agua coloreada (se supone que Galileo empleaba vino en sus termoscopios), y abierto a la atmósfera, donde se introduce un matraz de cuello largo y fino lleno de aire, de manera que el nivel del agua llegue más o menos a la mitad de la altura del cuello. Si se calienta el cuerpo del matraz (con el calor de las manos, por ejemplo), la presión del aire aumenta y expulsa la columna de líquido de su cuello, haciéndola descender. Al no disponerse de una

escala de temperaturas no se trata de un verdadero termómetro (*termos* significa calor y *metro* indica medida), por lo que se conocen estos aparatos con el nombre de termoscopios.

APLICACIÓN EN EL AULA

Nosotros hemos construido un termoscopio fácil de utilizar y de realizar, especialmente apropiado para el uso en el aula. Consiste en una botella de plástico duro transparente que contiene agua teñida, con un tubo fino de plástico que atraviesa una especie de tapón fabricado con plastilina, como indica la figura. El tubo debe ser de un diámetro del orden de un par de milímetros (que puede obtenerse de un bolígrafo gastado) y el cierre debe ser hermético. El funcionamiento es semejante al del termoscopio florentino, aunque la disposición de los elementos está invertida respecto al original; al calentarse el gas de la botella, su volumen aumenta y el agua asciende por el tubo central dando una idea aproximada del aumento de temperatura.



Podemos construir otra variante del termoscopio empleando una lata de refresco con un trozo de goma de globo y una pajita, como indica la ilustración.



Cuando calentamos el aire del interior de la lata, éste se expande y produce un desplazamiento de la superficie de la goma que hace subir el indicador.



Sin duda nuestro lector se habrá dado cuenta de que los termoscopios del tipo que hemos estudiado adolecen de un defecto fundamental, su sensibilidad a las variaciones de la presión atmosférica. Si ésta aumenta, empujará a la columna de agua falseando la medida de la temperatura. Por ello pueden ser considerados igualmente barómetros, y así los utilizaremos cuando llegue el momento. Pero de ello nos ocuparemos más adelante.



Si enfriamos de nuevo el aire del interior, éste se contrae y vuelve a su posición original.



1654: FERNANDO II INVENTA EL TERMOSCOPIO
CERRADO

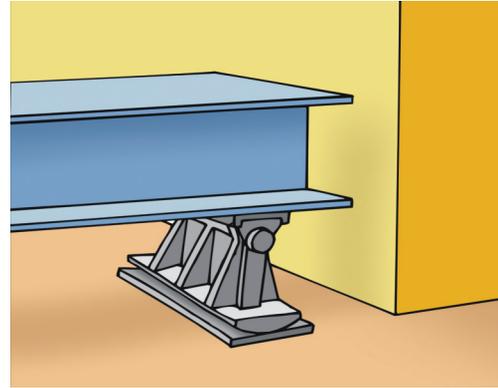
La existencia de una unidad de medida es fundamental para la ciencia, y para ello es necesario un acuerdo entre los científicos. En el caso del termómetro, el establecimiento de una unidad requiere fijar dos temperaturas, o puntos fijos, que sean fáciles de obtener en cualquier laboratorio, e independientes de otras variables. Una vez fijados estos dos puntos, se divide el intervalo que los separa en un número determinado de unidades y se enumeran, obteniéndose así un verdadero termómetro.



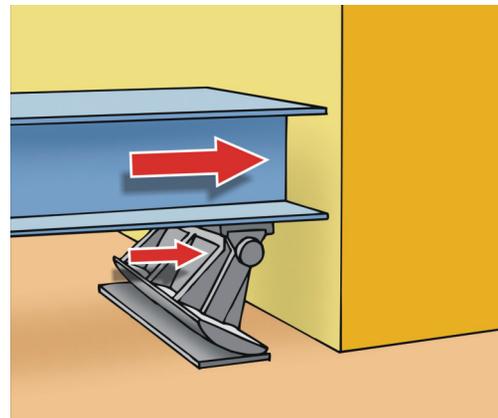
El primer intento de fijar una escala termométrica que se conoce se debe al médico romano Galeno, y data del año 170 a.C. Galeno propuso como punto fijo el correspondiente a una mezcla de dos pesos iguales de hielo fundente y agua hirviendo. Esta temperatura, que él creyó intermedia, era de 10 de nuestros grados celsius actuales, pero por alguna razón su propuesta no prosperó.

El paso decisivo para la medida de la temperatura se debe a Fernando II, duque de Toscana y científico por afición, sin duda la única manera de serlo. Pero antes de estudiar su gran aportación vamos a tratar del fenómeno en que se basa: la dilatación de los cuerpos.

Sin duda todos nos hemos fijado en las juntas de dilatación de los puentes. En el caso de que sean metálicos, estas juntas son fácilmente observables y su funcionamiento es muy claro. Sirven para absorber los cambios de longitud que sufren las vigas cuando aumenta su temperatura. En la figura siguiente podemos ver una de las formas en que esta absorción se lleva a cabo, mediante piezas basculantes de gran tamaño.



En invierno los materiales se retraen disminuyendo su longitud, como se observa en la figura anterior, pero en verano se dilatan absorbiéndose el aumento de longitud en la forma en que se ve en la figura siguiente:

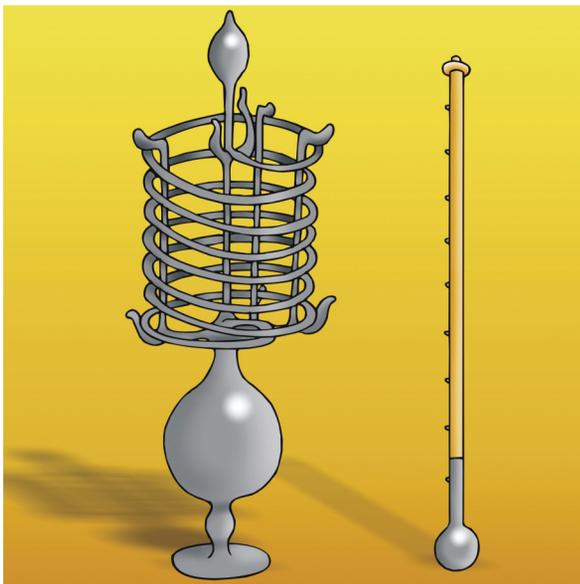


El fenómeno de la dilatación térmica ocurre en la mayoría de los materiales y en cualquiera de los estados en que se presente, pero no en todos. El agua, por ejemplo, es una excepción, ya que desde su temperatura de fusión hasta los cuatro grados disminuye de volumen, comportándose de la forma habitual en el resto del intervalo de temperaturas.

El primer termoscopio que utiliza líquido en un recipiente cerrado como medio indicador fue inventado por el Gran Duque de Toscana, Fernando II. Fue amigo personal de Galileo y durante el juicio que éste sufrió por

la Inquisición siempre abogó por su inocencia. En su corte estableció una especie de laboratorios reales en los que se llevaron a cabo experimentos sobre la determinación de la temperatura y la humedad. Su termoscopio consiste en un recipiente cerrado, con un tubo fino en su parte superior lleno de alcohol hasta la mitad de su altura.

La mayoría de los termómetros que vemos en la actualidad son de líquido, ya que puede emplearse un volumen relativamente grande que se expande por un tubo muy fino, de manera que se pueda observar fácilmente su dilatación, y siguen las líneas generales del termoscopio de Fernando II. En éste, a diferencia de los termómetros actuales, el tubo indicador estaba abierto a la atmósfera en vez de cerrado en vacío. En la figura hemos representado uno de los termómetros utilizados por los socios de la Academia del Cimento hacia mediados del siglo XVII, tal como pueden verse en el Museo de Historia de la Ciencia de Florencia.



La idea de utilizar espíritu de vino, como se llamaba entonces al alcohol, en vez de agua, se debe a que no se congela a las temperaturas ordinarias en las que vivimos. El etanol tiene un punto de fusión de 114,1 grados celsius bajo cero, un punto de ebullición de 78,5 grados celsius y una densidad relativa aproximada de 0,8 a 20 grados. Como habrá observado el lector, los termómetros de espíritu de vino no pueden usarse a la temperatura de ebullición del agua, lo que tendrá consecuencias a la hora de establecer sus puntos de calibrado.

Aunque el termoscopio de Fernando II cumplía con las características técnicas necesarias para convertirse en un verdadero termómetro, al no establecerse a la vez una escala reconocida por todos los científicos, no prosperó. Como veremos, la sociedad tendría que esperar la llegada de Gabriel Fahrenheit, medio siglo después, para que se estableciese el tan esperado acuerdo sobre la unidad de temperatura.

Sin embargo, a partir de la actividad de investigación de la corte de Fernando II nació la Academia del Cimento (Academia del Experimento) fundada por su hermano Leopoldo en 1657, cinco años antes que la Royal Society de Londres, creada por Carlos II.



1702: FAHRENHEIT CONSTRUYE EL PRIMER
TERMÓMETRO

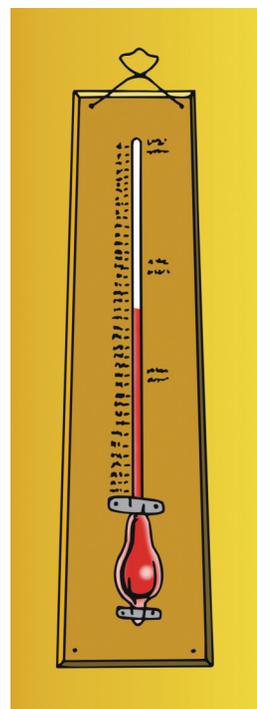
En nuestra historia sobre los termómetros hemos dejado a la humanidad hacia mediados del siglo XVII, poco después de la muerte de Galileo, con el termoscopio de alcohol recién descubierto. Como en muchas ocasiones en la historia de la ciencia, el desarrollo de la termometría se basa en el descubrimiento de que los cambios de fase, como la fusión del agua o la ebullición, tienen lugar a la misma temperatura cuando ocurren a la misma presión. Éstos son los famosos puntos fijos en cuya existencia se basa la calibración de los termómetros. Pero para darse cuenta de que la temperatura de estos procesos es siempre la misma, es necesario disponer de un termómetro previamente calibrado, con lo cual el proceso requiere una cierta intuición y muchos ensayos de prueba y error.

El siguiente intento de establecer una escala termométrica se debe a Robert Hooke. En 1664 Hooke era el encargado del laboratorio de la Royal Society y recibió el encargo de presentar una propuesta de estandarización de la temperatura. Hooke presentó un termómetro básicamente igual al de Fernando II, en cuyo tubo había marcado un punto fijo que correspondía a la altura que alcanzaba la columna cuando el aparato se sumergía en el hielo fundente. En su escala, un aumento de un uno por mil de volumen de alcohol correspondía a dos grados, con lo cual sólo era necesario utilizar un punto fijo para establecer la escala, conocida como la del Greshman Collage.

En 1702 el astrónomo Olaf Roemer, conocido fundamentalmente por haber demostrado que la velocidad de la luz es finita, inventó una escala termométrica que empleaba dos puntos fijos: el de fusión del hielo, al que asignó una temperatura de sesenta grados, y el de ebullición del agua, al que le asignó la de siete grados y medio. Unos años más tarde, en 1724, Gabriel Fahrenheit tuvo la idea de utilizar mercurio en lugar de alcohol como material termométrico, debido a sus excelentes características, ya que tiene un alto coeficiente de expansión bastante uniforme, una superficie

muy reflectante que facilita la determinación de la altura y un amplio rango de temperaturas en el que se mantiene líquido. El punto de congelación está a $-38,8$ grados celsius y el de ebullición es de $356,7$ grados celsius, temperaturas que señalan los límites de utilización. Además no se adhiere al vidrio, lo que es una gran ventaja.

Fahrenheit utilizó un tubo de vidrio uniforme, de manera que la sección fuese constante, llenó su depósito de mercurio y lo cerró en vacío, procediendo a continuación a la calibración del instrumento. Fijó en un principio la temperatura de fusión del hielo en treinta grados, pero finalmente la aumentó a treinta y dos. Nos hemos permitido introducir una modificación en la descripción original del proceso de calibración de sus termómetros (era fabricante de instrumentos) que reproducimos a continuación:



“Colóquese el termómetro en una mezcla de hielo, agua y sal marina y señálese el correspondiente punto de la escala como cero. El segundo punto se obtiene empleando la misma mezcla, pero sin sal. Este punto se señala con la indicación de treinta y dos grados. El tercer punto se determina introduciéndose el termómetro en la boca, de manera que señale la temperatura de un hombre sano, y se marca como correspondiente a noventa y seis grados”.

Como podemos observar, Fahrenheit no utiliza la temperatura de ebullición del agua como punto fijo de su termómetro. Como buen experimentador sabía que esta temperatura depende de la presión atmosférica que, como ya había comprobado Pascal, varía con la altura. Además, también varía con el tiempo atmosférico. Fahrenheit consiguió determinar la variación de la temperatura de ebullición del agua en función de la presión atmosférica, preparando así los trabajos de Celsius. Asimismo comprobó que cada líquido tiene un punto de ebullición característico.



Con un termómetro calibrado de esta manera la temperatura de ebullición del agua a la presión media del nivel del mar corresponde a 212 grados fahrenheit, con lo que la diferencia entre el punto de ebullición y el de fusión del agua resulta ser de 180 grados, como los sexagesimales de un ángulo llano o un semicírculo. Newton había sugerido 12 partes iguales entre la congelación del agua y la temperatura del cuerpo humano.



1742: LA ESCALA DE CELSIUS

En 1742 el astrónomo sueco Anders Celsius publicó un artículo en los Anales de la Real Academia de Ciencias Sueca sobre la elección de puntos fijos en la calibración de un termómetro. Representó un avance sustancial sobre los puntos fijos de Fahrenheit cuyo tercer punto, correspondiente a la temperatura del cuerpo humano, dista mucho de tener la exactitud requerida en los trabajos científicos. Para evitar esta indeterminación, Celsius propone utilizar la temperatura de ebullición del agua, pero corrigiéndola de acuerdo con la presión a la que ocurre la ebullición. En su artículo original Celsius escribe:

“La temperatura a la que hierve el agua es siempre proporcional a la presión barométrica, y por cada 28 milímetros de variación de la columna del barómetro de mercurio, la altura de la indicación del termómetro aumenta en un grado de los que yo utilizo”.

Para calibrar el termómetro de acuerdo con Celsius deben realizarse las siguientes operaciones:

1. Introdúzcase el bulbo del termómetro en hielo fundente y márquese la altura alcanzada por el mercurio como correspondiente a 100 grados.
2. Márquese la temperatura correspondiente a la ebullición del agua a 760 milímetros de altura del barómetro como el cero de temperatura. Si la presión fuera diferente, deben hacerse las correcciones citadas.
3. Divídase la distancia entre ambas marcas en cien partes, de manera que el cien corresponda al hielo fundente y el cero al agua hirviendo.

La escala invertida de Celsius tuvo una vida corta. Tres años después el naturalista de fama universal Carolus Linnaeus de Upsala publicó una escala también centígrada en la que la temperatura de fusión del hielo era de cero grados y la de ebullición, a una presión de 760 milímetros, de cien grados. Ésta es la escala centígrada que se popularizó rápidamente y que es la que se

utiliza en Europa; en los países anglosajones siguen utilizando la escala Fahrenheit. El nombre del Celsius se hizo famoso a partir de 1948 en que la IX Conferencia de Pesos y Medidas redefinió los puntos fijos y decidió asociarlos al grado centígrado resultante. Así los nombres de Fahrenheit y Celsius han pasado a la historia; ambos vivieron en la misma época, en el norte de Europa, aunque no hay constancia de que se conocieran personalmente.



LA NATURALEZA DEL
CALOR



EL CALOR, UNA NUEVA MAGNITUD



Como dijimos en nuestra exposición del modelo de Aristóteles, uno de los cuatro elementos sublunares era el fuego, responsable de que los cuerpos apareciesen calientes o fríos. Cuando un cuerpo caliente entra en contacto con otro frío, el elemento fuego pasa de uno a otro produciendo el enfriamiento de uno y el calentamiento del otro. El hecho de que el calor viniese del Sol o de cuerpos en combustión que emitían luz generó una cierta confusión sobre la naturaleza de la luz y del fuego, confusión que permanecería durante muchos siglos.

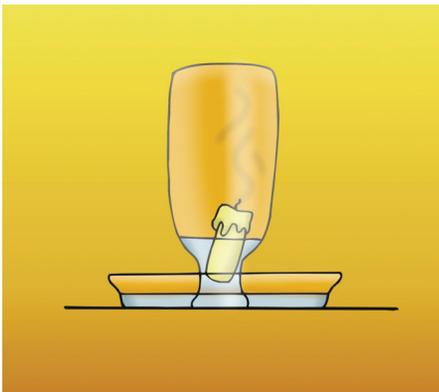


1674: EL EXPERIMENTO DE JOHN MAYOW
SOBRE LA COMBUSTIÓN EN EL AIRE

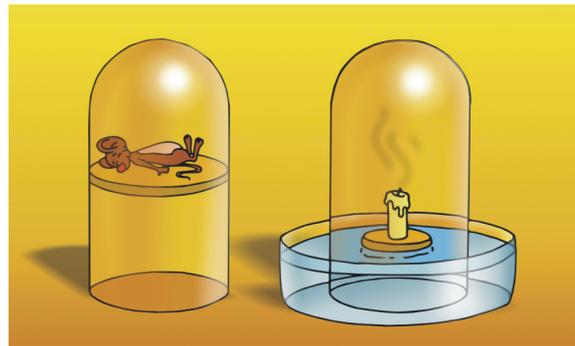
John Mayow nació en 1643 y murió en 1679. Aunque estudió leyes en Oxford se dedicó profesionalmente a la medicina y a la investigación, realizando experimentos sobre la composición del aire. En 1674 publicó su obra *De sal-nitro et spiritu nitro-aereo*, en la que explicaba que en el aire existían al menos dos tipos de gases distintos, uno de los cuales era necesario tanto para la combustión como para la respiración. Mayow llegó a esta conclusión de una manera muy simple, haciendo arder una vela en el interior de un frasco cerrado, colocado todo sobre un plato con agua para hacer el conjunto estanco.



Observó, como podemos hacer nosotros, que la vela arde un tiempo limitado, apagándose a continuación.



Como podemos ver en la figura adjunta, a la vez que se apaga la vela el agua asciende por el frasco, indicando que la presión en el interior ha disminuido debido, sin duda, a que la cantidad de gas es menor. Además observó que en el gas que queda después de apagarse la vela no pueden vivir los animales. Comprobó también que el proceso de respiración de los animales consume el mismo tipo de gas que la combustión. Mayow llegó a esta conclusión por el procedimiento de introducir en el recipiente un ratón.



A primera vista la explicación del experimento de la vela y el frasco parece sencilla, pero en realidad consiste en una serie de procesos concatenados. Como todos sabemos, aunque Mayow lo desconocía, el aire seco está formado principalmente por un 78% de nitrógeno y un 21% de oxígeno. Cuando se produce la combustión de la vela el oxígeno del aire se combina con el carbón de las sustancias combustibles de la cera y forma CO_2 , que se disuelve en parte en el agua (y algunos hollines que se pegan a las paredes del frasco). A la vez se calienta el nitrógeno restante y aumenta de volumen en una proporción tal que contrarresta el CO_2 disuelto, por lo que el agua no asciende durante el tiempo que dura la combustión. Una vez que el oxígeno se ha consumido, el nitrógeno y el CO_2 producido, que se encuentran en fase gaseosa, se enfrían, disminuyendo su volumen y produciéndose el ascenso del agua en el frasco.



EL FLOGISTO Y EL CALÓRICO

Hacia 1700 Georg Ernest Stahl (1660-1734) modificó la teoría griega del calor introduciendo un elemento nuevo al que llamó flogisto, que se comportaba más o menos como el fuego aristotélico. Cuando un cuerpo ardía, el flogisto que contenía pasaba del cuerpo en cuestión al aire, explicándose así la pérdida de peso que se observa cuando arde la madera o la mayoría de los combustibles.

Para explicar el experimento de John Mayow, en el que el aire de un frasco sólo podía sustentar la combustión de una vela o la respiración de un ratoncillo durante un tiempo determinado, hubo de postularse que el aire sólo podía admitir una cierta cantidad de flogisto, es decir, que se saturaba y una vez saturado no podía sustentar la combustión ni la respiración. Así, cuando Joseph Priestley (1733-1804) descubre el oxígeno lo llama aire vivificante o desflogistizado, justamente por su gran capacidad de mantener la combustión.

En 1770 Priesley viaja a París y allí visita a Antonie Lavoisier, comunicándole su descubrimiento del aire desflogistizado. Pero Lavoisier se da cuenta inmediatamente de que se trata de un nuevo elemento, al que llama *oxígeno*, generador de ácidos, y de que el oxígeno es el elemento de Jean Rey, responsable de la respiración y de la combustión. En su obra *Sur la Combustion en General* publicada en 1777, Lavoisier explica los procesos de combustión y calcinación de los metales como una combinación con el oxígeno del aire, abandonando la idea del flogisto. En su lugar introduce un elemento nuevo, el calórico, definido como un fluido imponderable que pasaba de los cuerpos calientes a los fríos y que se generaba en la combustión de una manera que no quedaba nada clara. Es fundamental saber que Lavoisier incluía el calórico entre los elementos químicos. El comportamiento de este elemento era realmente extraño; no tenía masa, ya que los cuerpos cuando se calentaban no aumentaban de peso, pero ocupaba espacio, ya que los objetos aumentaban su tamaño cuando se calentaban. Además atravesaba cualquier sustancia. Para que nuestro lector se haga

una idea de los conocimientos de aquella época, enumeramos los elementos químicos tal y como aparecen en su *Traité Élémentaire de Chimie*, publicado en 1789, el año de la Revolución. Nótese la inclusión de la luz entre los elementos químicos.

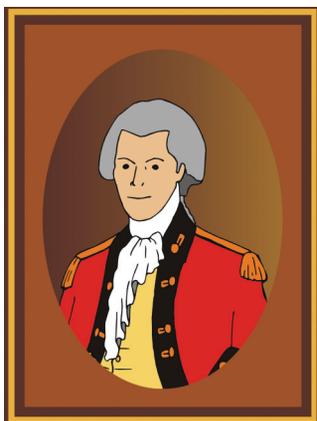
Elementos de Lavoisier con nombres actuales:

Luz
Calórico
Oxígeno
Nitrógeno
Azufre
Fósforo
Carbón
Flúor
Boro
Radical muriático (desconocido hasta ahora)
Antimonio
Arsénico
Bismuto
Cobalto
Cobre
Oro
Hierro
Plomo
Magnesio
Mercurio
Molibdeno
Níquel
Platino
Plata
Estaño
Wolframio
Zinc



EL EXPERIMENTO DE UN CIENTÍFICO MUY
ESPECIAL, BENJAMÍN THOMPSON

En 1798 Benjamín Thompson descubrió la verdadera naturaleza del calor y terminó así con las misteriosas propiedades del calórico, a la vez que lo expulsaba de la lista de los elementos químicos.



Thompson nació en 1753 en el seno de una familia de origen inglés asentada en Norte América, entonces un territorio colonial de Inglaterra. Comenzó ejerciendo de maestro, pero pronto comenzó a interesarse por las ciencias, en especial por los procesos que tenían lugar en la combustión de la pólvora. Esta sustancia siempre había despertado el interés de los estudiosos, ya que no necesita aire para arder y produce un enorme volumen de gases, gran cantidad de calor y muy poco residuo sólido.

Durante la Guerra de la Independencia americana se mantuvo al lado de los ingleses; en el bando de los independentistas se encontraba su tocayo Benjamín Franklin (1706-1790), cuya vida puede muy bien compararse a la de nuestro protagonista. En España reinaba Carlos III, que envió tropas en ayuda de los independentistas y situó la armada española frente a las Islas Británicas, con lo que inmovilizó a la flota inglesa. Al terminar la guerra, Thompson hubo de abandonar su tierra y huir a Europa, dejando allí a su mujer, a su hija y todas sus posesiones. Entre éstas se encontraba una extensa propiedad en la localidad de Rumford. En su peregrinar por Europa trabajó durante algunos años para el Duque de Baviera quien, para agradecer sus excelentes servicios, lo nombró Conde de Rumford del Sagrado Imperio.

El descubrimiento de Thompson es un ejemplo de cómo un experimento en extremo sencillo, si se analiza correctamente, puede cambiar el curso de la historia de la ciencia.

Durante su estancia en Baviera, uno de los trabajos de Benjamín Thompson consistió en supervisar la fabricación de cañones en la ciudad de Munich. En esa época el proceso consistía en vaciar los cuerpos cilíndricos mediante un taladro movido por tracción animal. La operación, como sabe todo el que haya taladrado un trozo de metal, genera una enorme cantidad de calor a la vez que divide el material en finas limaduras. De acuerdo con la teoría de Lavoisier, los cuerpos extensos, como los cilindros antes de ser taladrados, poseían más capacidad para contener calórico que los cuerpos de pequeñas dimensiones, como las limaduras. Por esa razón, al pasar el calor contenido en un cuerpo de grandes dimensiones a los trozos pequeños en que se dividía, su temperatura aumentaba. Thompson decidió comprobar esta explicación e ideó un experimento apropiado para ello. El experimento es tan ilustrativo y lleno de ingenio que lo vamos a describir (tomándonos algunas libertades) con cierto detalle ya que, en nuestra opinión, contiene los ingredientes esenciales de la calorimetría.

Thompson sujetó firmemente un cilindro macizo de metal en el fondo de un recipiente con 12 litros de agua. Eligió un taladro con las aristas gastadas, de manera que produjera gran cantidad de calor, y procedió a perforar el cilindro para fabricar un cañón de arma de fuego. Al final de la operación, que duró dos horas y media, se habían producido 269 gramos de limaduras de hierro y el agua había elevado su temperatura hasta alcanzar la ebullición. En esta primera parte del experimento había estimado la cantidad de calor *expulsada* durante la operación.

La segunda parte del experimento consistió en preparar dos recipientes de barro esmaltado exactamente iguales, calentar dos litros de agua hasta la temperatura de ebullición, y verter un litro en cada uno de los dos recipientes. A continuación introdujo 263 gramos de limaduras de hierro a temperatura ambiente en uno de los recipientes, y un cilindro macizo del mismo material

y a la misma temperatura, también de 263 gramos de peso, en el otro. Al cabo de un cierto tiempo comparó las temperaturas de ambos vasos con ayuda de un termoscopio (pues en 1798 todavía no se había inventado un verdadero termómetro) y comprobó que la temperatura final era la misma. De aquí dedujo, correctamente, que el material no había perdido en absoluto su capacidad de almacenar calor al dividirse en limaduras finas, por lo que la explicación basada en el calórico de Lavoisier no podía ser correcta. Todo el calor tenía que haberse producido como consecuencia del trabajo realizado por los animales para perforar el cilindro de hierro.

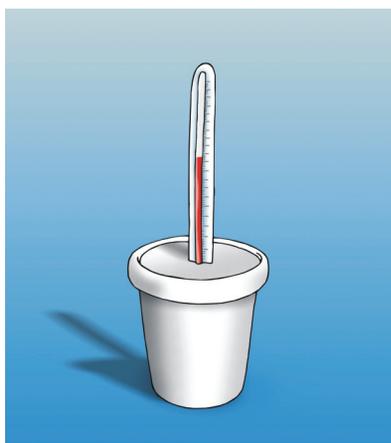
Ese mismo año Thompson comunicó sus resultados a la British Royal Society, en un trabajo titulado *An Enquiry Concerning the Source of Heat*, en el que explicó que el calor no era una sustancia sino una forma de energía equivalente al trabajo. Por este resultado tiene un lugar en la ciencia y por ello aparece en nuestro relato. Pero con su descubrimiento Thompson había introducido un nuevo concepto de calor, íntimamente relacionado con el de temperatura, que necesitaba una inmediata y profunda investigación. En 1803 se trasladó a París y, por uno de esos designios curiosos del destino, se casó con la viuda de Lavoisier, aunque la unión apenas duró cuatro años. Tras la separación, continuó viviendo en París en compañía de su hija hasta su muerte, en 1814.



LA MEDIDA DE LA CANTIDAD DE CALOR

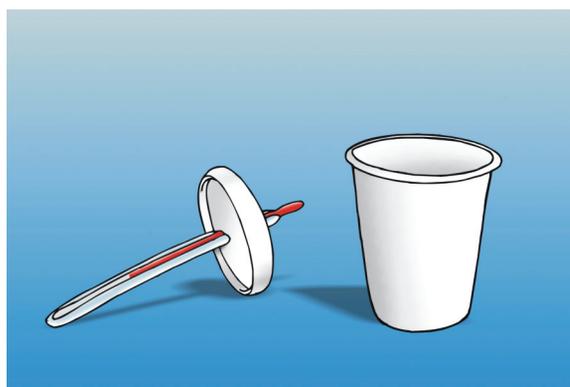
APLICACIÓN EN EL AULA

En ciencia una magnitud es algo que se puede medir o contar, por lo que el primer paso en la investigación del calor debe ser la construcción de un instrumento que nos permita medir cantidades de calor. El aparato recibe el nombre de calorímetro (del latín *calor* y *metro*, medida). Nosotros vamos a describir un calorímetro elemental que nos servirá para introducir el concepto de calor y enlazarlo con el de temperatura. Consiste básicamente en un vaso de poliestireno que contenga una cantidad conocida de agua (en nuestro caso 100 centímetros cúbicos, cuya masa es cien gramos), provisto de una tapa aislante que hemos recortado de una plancha del mismo material que el vaso y de un termómetro de mercurio que nos permita leer la temperatura del agua.



Nos encontramos ahora en la misma situación que los fabricantes de termoscopios; debemos establecer una unidad de cantidad de calor, a la que llamaremos caloría, para convertir nuestro instrumento en un verdadero aparato de medida. De forma aproximada definimos la caloría *como la cantidad de calor necesaria para elevar un grado la temperatura de un gramo de agua*. Como nuestro calorímetro contiene cien gramos de agua, habrá que aportar cien calorías por cada grado que aumente su temperatura.

Para fijar ideas y ver cómo funciona nuestro calorímetro podemos realizar un experimento sencillo, pero ilustrativo. Supondremos que el agua del calorímetro está inicialmente a 20 grados celsius. Con ayuda de unas pinzas calentamos siete monedas de dos euros hasta que alcancen 100 grados; para ello no tenemos más que introducir las en agua hirviendo y mantenerlas un tiempo razonable, unos cinco minutos, para asegurarnos de que han alcanzado la temperatura del agua en ebullición. A continuación levantamos la tapa y las introducimos en nuestro calorímetro.



Volvemos a situar la tapa en su sitio y esperamos a que las monedas se enfríen y el agua se caliente, llegando ambas a la misma temperatura final de equilibrio que resulta ser de unos 23,9 grados. Las monedas, al enfriarse, han cedido la cantidad de calor necesaria para elevar en 3,9 grados la temperatura de cien gramos de agua, es decir, que han aportado unas 390 calorías.

Como acabamos de ver, es muy sencillo calcular la cantidad de calor cedida al agua del calorímetro, ya que obedece a la ecuación:

$$\text{Cantidad de calor aportada al agua} = \text{masa de agua} \cdot (\text{temperatura final} - \text{temperatura inicial}) = \text{masa de agua} \cdot \text{diferencia de temperaturas.}$$

Si en vez de llenar el calorímetro con agua hubiésemos empleado alcohol etílico y hubiésemos realizado el mismo experimento, el incremento de temperatura habría sido mayor, de unos 6,8 grados en vez de los 3,9 grados. Esto indica que un gramo de alcohol necesita menor cantidad de calor que un gramo de agua para elevar su temperatura a un grado. *La cantidad de calor necesaria para elevar un grado celsius la temperatura de un gramo de una sustancia recibe el nombre de calor específico de la sustancia.* De acuerdo con esta definición, el calor del alcohol es de 0,57 calorías por grado y gramo. La ecuación que sigue el alcohol en este caso es:

$$\text{Cantidad de calor aportada al alcohol} = \text{masa de alcohol} \cdot (\text{temperatura final} - \text{temperatura inicial}) \cdot 0,57 = \text{masa de alcohol} \cdot \text{diferencia de temperaturas} \cdot \text{calor específico de alcohol.}$$

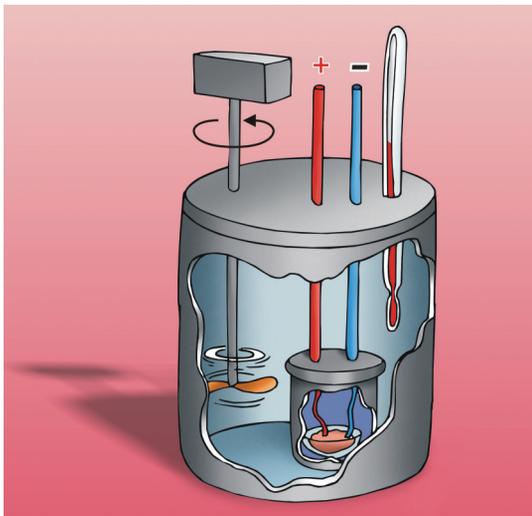
A continuación se indican los valores específicos de algunas sustancias:

Aluminio	0,22
Cobre	0,09
Bronce	0,09
Oro	0,03
Plata	0,06
Agua	1,0
Hielo	0,49
Vidrio	0,20
Granito	0,19

6

UNA MODIFICACIÓN DEL CALORÍMETRO: LA BOMBA CALORIMÉTRICA

Para medir el calor desprendido por una reacción química, por ejemplo durante la combustión de un gramo de azúcar, modificamos nuestro calorímetro añadiendo una cámara metálica en la que colocamos el azúcar y el oxígeno necesarios para el proceso, así como un hilo conductor eléctrico que inicie la combustión. El calor de la reacción pasará al agua, elevando su temperatura y permitiéndonos determinar la cantidad de calor producida en la reacción.



Esta es la manera como se mide el poder calorífico de los alimentos, que suelen aparecer en los envases. Nuestro lector habrá adivinado que la digestión que realizan los animales es equivalente a un proceso de combustión lenta, en la que el combustible es el alimento ingerido y el carburante es el oxígeno del aire que respiramos. Los resultados de la combustión de los componentes básicos de los alimentos son los siguientes,

- 1 gramo de grasa: 9 kilocalorías
- 1 gramo de alcohol: 7 kilocalorías
- 1 gramo de proteína: 4 kilocalorías
- 1 gramo de hidratos de carbono: 3.75 kilocalorías

A partir de estos datos, si conocemos la composición de un alimento, es decir, el tanto por ciento de alcohol, grasa, proteínas e hidratos de carbono que contiene, conocemos su poder energético. A continuación indicamos el valor energético de algunos alimentos comunes.

- Bistec de cerdo 100 gramos 250 kilocalorías
- Buey 100 gramos 255 kilocalorías
- Chuleta de cordero asada 100 gramos 350 kilocalorías
- Chuleta de cerdo 100 gramos 336 kilocalorías
- Carne de pollo 100 gramos 130 kilocalorías
- Hígado de cerdo 100 gramos 260 kilocalorías
- Hígado de ternera 100 gramos 250 kilocalorías
- Cordero asado 100 gramos 200 kilocalorías
- Almendras 100 gramos 640 kilocalorías
- Cervezas 100 gramos 60 kilocalorías
- Ciruela fresca 100 gramos 47 kilocalorías
- Naranja de una pieza 46 kilocalorías
- Limón de una pieza 12 kilocalorías
- Manzana 100 gramos 58 kilocalorías
- Melón 100 gramos 40 kilocalorías
- Naranja dulce 100 gramos 42 kilocalorías
- Plátano 100 gramos 122 kilocalorías
- Melocotón 100 gramos 45 kilocalorías
- Uvas 100 gramos 76 kilocalorías
- Uvas pasas 100 gramos 300 kilocalorías
- Crema de leche 1 cuchara sopera 15 gramos 37 kilocalorías
- Leche con chocolate 1 vaso 150 ml 185 kilocalorías

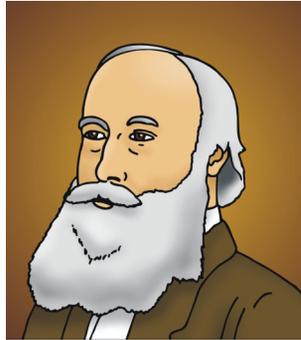
- Leche condensada 1 cuchara sopera 20 gramos 66 kilocalorías
- Leche desnatada 1 vaso 200 ml 124 kilocalorías
- Leche semidesnatada 1 vaso 200 ml 96 kilocalorías
- Nata 1cuchara 20 gramos 42 kilocalorías
- Cuajada 1cuchara sopera 20 gramos 52 kilocalorías
- Yogur desnatado unidad 126 kilocalorías
- Yogurt natural unidad 138 kilocalorías
- Acelgas hervidas 180 gramos 30 kilocalorías
- Alcachofas hervidas unidad 120 gramos 60 kilocalorías
- Arroz blanco hervido cuchara sopera 20 gramos 26 kilocalorías
- Berenjenas unidad 250 gramos 489 kilocalorías
- Cebolla hervida unidad 100 gramos 41 kilocalorías
- Escarola 20 gramos 7 kilocalorías
- Habas hervidas 80 gramos 100 kilocalorías
- Lentejas hervidas 1 cuchara sopera 20 gramos 39 kilocalorías
- Nabos 100 gramos 35 kilocalorías
- Pepino unidad 150 gramos 5 kilocalorías
- Pimiento verde 2 unidades 100 gramos 29 kilocalorías
- Rabanitos 100 gramos 16 kilocalorías
- Tomate unidad 100 gramos 20 kilocalorías

A veces se suele emplear una notación simplificada en la que en lugar de kilocalorías (mil calorías) se emplea Caloría con C mayúscula. No se debe confundir con la caloría, mil veces menor.



EL EXPERIMENTO DE JOULE

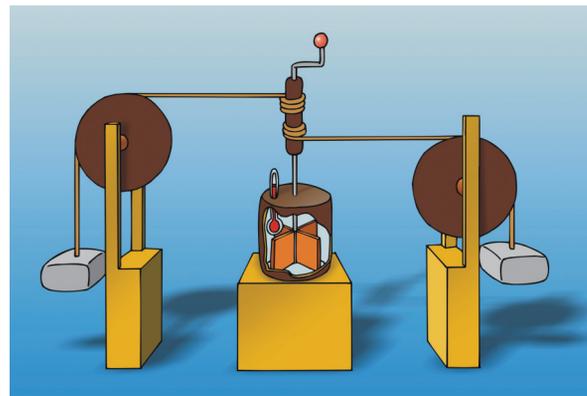
Nos encontramos en 1798. Por medio del calorímetro se estudiaron los conceptos de calor y temperatura, relacionados entre sí por medio del calor específico. Por otra parte, también existe una relación entre el calor y la energía, pero lo único que se sabía era que el trabajo de dos horas y media de perforación en el experimento de Thompson se había transformado en calor en cantidad suficiente para hacer hervir 12 litros de agua que se encontraban inicialmente a temperatura ambiente, con una cantidad de calor absorbido que puede estimarse en unas 960.000 calorías. Pero como no se conocía la cantidad de trabajo realizado por los animales que movían el taladro, no se pudo calcular la equivalencia entre calor y trabajo.



Aunque la humanidad tuvo que esperar hasta mediados del siglo XIX para que Joule determinara dicha equivalencia, nosotros, gracias a la magia de la imaginación, volamos al laboratorio de James Prescott Joule para sorprenderlo realizando uno de los experimentos más famosos de la historia de la ciencia, el que determina el equivalente mecánico del calor.

James Prescott Joule nació en 1818 en Lancashire, en el seno de una familia dedicada a la fabricación de cerveza. De acuerdo con la manera de pensar de los industriales ingleses de la época, sus padres le proporcionaron la mejor educación que estaba a su alcance en materia científica, asistiendo a las clases de John Dalton. Vivió en pleno romanticismo, que en la Inglaterra de la revolución industrial coincidió con el desarrollo de la electricidad. En 1831 Joule pudo leer, sin lugar a dudas, la primera edición de *Frankenstein* de Mary Shelley, en la que el monstruo volvía a la vida por medio de una descarga eléctrica producida por una tormenta.

El experimento de Joule consiste básicamente en repetir el proceso de Thompson en el que, como nuestro lector recordará, el trabajo de perforar un cañón se transformaba en calor. Joule diseñó un experimento determinando de manera muy precisa la energía exterior que se aporta al sistema, ya que corresponde a la caída de unos pesos. Esta energía se emplea en agitar el agua del interior de un calorímetro, donde se puede medir con precisión el calor generado a partir de la elevación de temperatura del agua. El esquema del aparato que utilizó puede verse en la siguiente figura:



Consiste en una rueda con paletas, unida a una polea con dos pesos en sus extremos que caen desde una altura determinada. El trabajo se transforma en calor, que puede medirse como en una bomba calorimétrica.

El resultado del experimento, realizado en el sótano de su fábrica de cerveza, es uno de los más famosos de la física y su investigación fue tan importante que se le dio su nombre a la unidad de trabajo, *el joule*. Un joule, o un julio, es el trabajo que realiza una fuerza de un newton cuando se desplaza a lo largo de un metro. Como nuestro lector sabe, equivale aproximadamente al trabajo que realiza un cuerpo de 100 gramos de masa (cuyo peso es un newton) cuando cae desde una altura de un metro. En el caso del experimento que nos ocupa, Joule empleó justamente el trabajo realizado por el peso de las dos masas que descendían aunque, claro está, no pudo emplear su propia unidad y utilizó

la de libra pero por pie; ni el julio había sido definido ni su humildad le habría permitido usarlo.

Como el lector sabe, el experimento de Joule dio como resultado que una caloría equivale a 4,18 julios, o lo que es lo mismo, un julio se transforma en 0,24 calorías.

Para fijar ideas, que podemos transmitir a nuestros alumnos, calcularemos (de una manera muy simplificada y con un exclusivo propósito didáctico) el comportamiento energético del cuerpo humano. Ya hemos visto antes el poder calorífico de los alimentos, determinado por medio de la bomba calorimétrica. Debemos ahora calcular en qué se consume esta energía. Tradicionalmente se clasifica en dos grandes apartados: la energía empleada en el metabolismo basal y la que utilizamos para realizar trabajo.

El metabolismo basal es el que se emplea en mantener la temperatura corporal constante, de unos 36,6 grados celsius, y para que nuestro cuerpo realice correctamente los procesos que le permiten continuar vivo: funcionamiento del corazón, respiración, etc. sin realizar ningún otro trabajo corporal.

Podemos calcular de forma aproximada la energía consumida en el metabolismo basal, en kilocalorías por día, empleando la fórmula siguiente.

	3-10 años	> 10 años
Mujeres	$500 + 22.5 \times \text{peso}$ en kilogramos	$750 + 12 \times \text{peso}$ en kilogramos
Hombres	$500 + 30 \times \text{Peso}$ en kilogramos	$650 + 18 \times \text{Peso}$ en kilogramos

Por ejemplo, un hombre de 30 años que pese 70 kilogramos necesita $650 + 18 \times 70 = 1.910$ kilocalorías al día. A estas necesidades hay que añadir la energía

consumida por el trabajo que se realiza a lo largo del día. A continuación se muestra una tabla con valores aproximados de la energía consumida por una persona de 70 kilogramos al realizar los ejercicios que se señalan:

Baile moderno: 500 kcal/h
 Bajar escaleras: 200 kcal/h
 Baloncesto: 650 kcal/h
 Ciclismo rápido: 400 kcal/h
 Andar a velocidad normal: 150 kcal/h
 Tenis 600: kcal/h
 Gimnasia: 385 kcal/h
 Levantamiento de pesas: 450 kcal/h
 Tareas sedentarias: 150 kcal/h

Para calcular las necesidades energéticas totales de una persona debemos sumar las calorías necesarias para su metabolismo basal y las que consume realizando ejercicio. Si ingerimos más energía de la que necesitamos, la almacenamos en forma de reserva y ganamos peso.

Si suponemos que la energía que no consumimos se almacena íntegramente en forma de grasa, como 1 g de grasa equivale a unas 9 kilocalorías, por cada 900 kilocalorías sobrantes en la alimentación se aumenta 100 gramos de peso. Lo contrario es también cierto. Si nuestra alimentación nos proporciona una energía inferior a la que necesitamos en 900 kilocalorías, las tomaremos “quemando” 100 gramos de las reservas que tenemos en forma de grasa. Así pues, si nuestras necesidades son de 2.500 kilocalorías al día, con una dieta de 1.600 calorías al día, adelgazaremos unos cien gramos diarios.

Descubriendo las moléculas: un proyecto para el aula es, tras la publicación de *Magnetismo en el Aula*, la segunda de las publicaciones que aparece como resultado de la colaboración entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Dirección General de Ordenación Académica.

Este libro ha sido escrito con la intención de facilitar al maestro los elementos indispensables para introducir la teoría molecular en el aula. Se presentan en principio los fundamentos teóricos y se aportan después ejemplos sencillos que permiten la aplicación práctica.

En *Descubriendo las moléculas: un proyecto para el aula* nos encontramos con la idea de que enseñar ciencia en los primeros niveles educativos es fundamental para estudios posteriores, además de posible si se establece el método adecuado: el trabajo conjunto de maestros e investigadores y la continua experimentación en el aula.



Comunidad de Madrid

CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN
Dirección General de Ordenación Académica