

# FILÓSOFOS, ALQUIMISTAS Y QUÍMICOS: HISTORIA DE LA QUÍMICA, (PARTE 1)

(Publicado por primera vez en Revista Universitaria-UABC, No. 54, abril-junio 2006)

Guadalupe Lydia Alvarez Camacho  
Instituto de Ingeniería, UABC

Amelia Olivas Sarabia  
Centro de Ciencias de la Materia Condensada, UNAM

Ilustraciones: Ernesto Israel Santillán Anguiano

Agradecimiento especial a José Luis Mietta de la Universidad de Buenos Aires por señalar algunas inconsistencias derivadas de errores en la Tabla 5 (agosto 2007).

## 1. La diversidad que nos rodea

En el mundo en que vivimos existen muchos tipos de paisajes: hay bosques, selvas, desiertos y también ciudades y pueblos. A pesar de sus diferencias, cualquier lugar al que volvamos los ojos estará siempre lleno de objetos distintos, formados todos de diferentes *sustancias*. Cada sustancia tiene sus propiedades características: algunas son líquidas como el agua y otras sólidas como la roca; algunas son inorgánicas como la arena y otras orgánicas como nuestra piel; algunas son fácilmente combustibles o inflamables como la madera, otras no lo son, como la piedra.

Las sustancias no siempre permanecen las mismas: cuando hervimos agua, se transforma en vapor, si la congelamos, se transforma en hielo; algunas sustancias se queman y quedan reducidas a cenizas. Las sustancias orgánicas también se transforman: los alimentos saben mejor después de cocinarlos y si no disponemos apropiadamente de ellos, se pueden descomponer. Las sustancias de las que está formado nuestro cuerpo también sufren cambios: con los años, nuestro cabello pierde poco a poco su color.



Figura 1: En el mundo en que vivimos, todo cambia... inclusive nosotros.

Algunas sustancias son buenas para la salud mientras que otras pueden matar: mientras que venenos como la cicuta pueden terminar con la vida de los más grandes filósofos, la mayoría de nosotros conocemos ese milagroso líquido blanco que acaba con el terrible ardor en el estómago. El quedarse encerrado en un elevador puede ser peligroso, ya que si permanecemos ahí mucho tiempo, el aire cambiará y dejará de ser bueno para respirar. Por el contrario, cuando visitamos un lugar lleno de árboles, como un bosque o un parque, aspiramos con deleite porque el aire es, en ese lugar, de excelente calidad.

Somos afortunados de que en ocasiones sea posible poner la transformación de sustancias a nuestro favor. Fue en los tiempos prehistóricos cuando los humanos descubrieron como obtener el cobre, calentando sus minerales en presencia de carbón. Poco después también se descubrió como obtener el hierro, por un procedimiento similar. Las técnicas para la fabricación de vidrio y de cerámica son también muy antiguas, como son también aquellas para la elaboración de tintes, perfumes, cosméticos y hasta medicinas. Estas técnicas se fueron perfeccionando al transmitirse de generación en generación y de cultura en cultura, hasta alcanzar elevados niveles de sofisticación.

Por desgracia, las sustancias también pueden transformarse contra nuestra voluntad. Por ejemplo, cuando compramos un nuevo juego de herramientas, estarán limpias y brillantes. Sin embargo, no podremos evitar que con el paso del tiempo, empiecen a verse sucias y deslucidas. Aunque las herramientas siguen siendo de metal, su superficie ya no mantiene ninguna cualidad que pudiéramos llamar metálica: se ha transformado en *herrumbre*. Este proceso, que a través del tiempo ha causado y causa muchos dolores de cabeza a la humanidad, se llama *corrosión*.

Evidentemente, el desarrollo de las primeras tecnologías comenzó cuando los humanos descubrieron el fuego. El fuego es el más eficiente auxiliar para la transformación de sustancias que existe. La vida de nuestros antepasados debe haber cambiado radicalmente con el conocimiento de sus propiedades. Cuando aprendieron que una llama encendida requiere tanto de una sustancia combustible como de un suministro de aire, pudieron entender que podían apagarla cortando el abastecimiento de cualquiera de los dos. Por razones obvias, aprender a apagar el fuego es tanto o más importante que aprender a encenderlo.

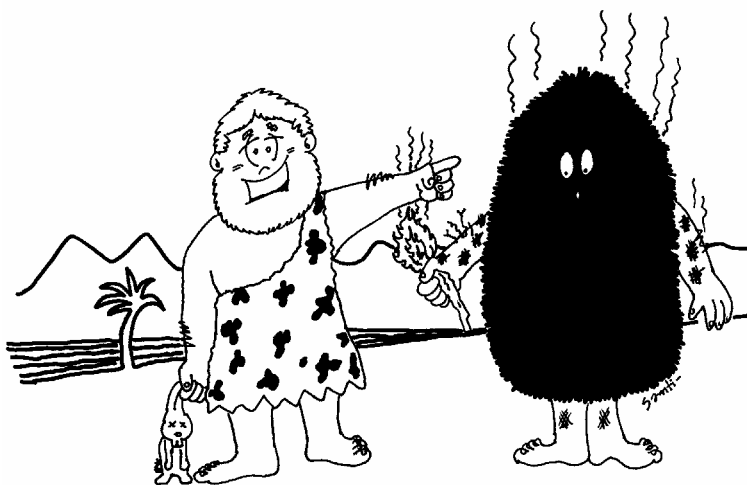
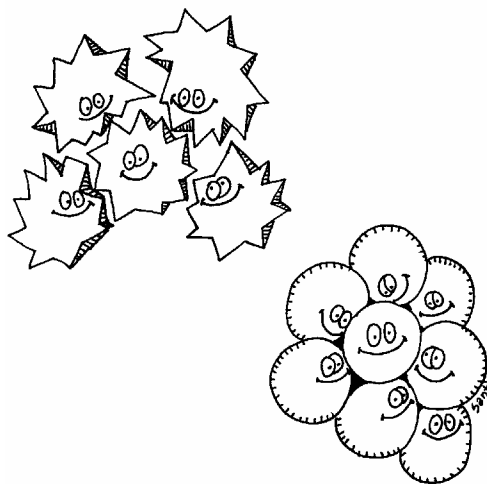


Figura 2: Aprender a apagar el fuego, es tanto o más importante que aprender a encenderlo.

## 2. Los filósofos griegos

En la famosa mitología griega, es Prometeo quien entrega el fuego a la humanidad y sufre un castigo eterno por su osadía. Fue también en Grecia donde, cinco siglos antes de la era cristiana, aparecieron los primeros filósofos. Los filósofos griegos no estaban contentos con saber que existen muchas sustancias que se transforman unas en otras. Para ellos era también importante saber porqué. ¿Por qué existen tantas sustancias? ¿Por qué sufren transformaciones?

Uno de estos filósofos, Empédocles, propuso que todas las sustancias están formadas por cuatro elementos que se combinan en distintas proporciones: *tierra, agua, aire y fuego*. Por su parte, la idea de Leucipo era que la materia está formada de pequeños corpúsculos imposibles de dividir a los que llamó *átomos*. Su discípulo Demócrito convirtió esta sencilla idea en una teoría completa. Los átomos podían tener diferentes tipos de ganchos que les sirvieran para unirse entre sí: los átomos entonces tendrían preferencia a unirse con otros átomos semejantes, debido a que sus ganchos son compatibles. La multiplicidad de sustancias se debería a la gran cantidad de formas que tienen los átomos de acomodarse entre sí. La transformación de sustancias se debía, por consiguiente, a que los átomos se reorganizaban. Según esta teoría, las cualidades de una sustancia se deben a la forma de los átomos que la constituyen. Por ejemplo, las sustancias picantes estarían formadas por átomos puntiagudos y las dulces, por átomos redondeados.



**Figura 3: Los filósofos griegos imaginaron los átomos como pequeñas partículas que se unían entre sí de acuerdo a sus semejanzas.**

El afamado Aristóteles creía en la existencia de una materia primordial sobre la que podían imponerse las cualidades *seco-húmedo* y *cálido-frío*. Por ejemplo, si a la materia primordial se le imponen las cualidades *cálido y seco*, se obtiene fuego. Al realizar esta transformación y cualquier otra no es la materia la que cambia sino su *forma*. Aristóteles creía que la materia es continua y que llena todo el universo ya que el vacío no puede existir.

Epicuro, a su vez, construyó todo un sistema filosófico, ético y moral, tomando como punto de partida el concepto de átomo. Para la *filosofía epicúrea* el movimiento fortuito de los átomos es suficiente para explicar el origen del universo y no se requiere la intervención de algún dios al que debiéramos obedecer y temer. De acuerdo a él, los seres humanos debemos obrar como nos resulte más conveniente, buscando aquello que nos haga

felices o, diciéndolo de otro modo, lo que nos cause placer. Estas subversivas ideas le valieron a Epicuro el que Dante Alighieri lo colocara en medio de terribles tormentos, en el infierno de su famosa obra “La Divina Comedia”

### 3. Los alquimistas medievales

Allá por el siglo quinto de la era cristiana, la invasión de los bárbaros o como prefieren llamarle los alemanes, la migración de los pueblos, acabó con el Imperio Romano. A partir de entonces, y hasta el Renacimiento, mil años después, el poder quedó casi totalmente en manos de la Iglesia Católica. Durante este periodo, ni los átomos, ni la filosofía epicúrea gozaron de mucha popularidad. Era claro para las autoridades que el fin de la vida no era el placer sino el deber, en particular, el deber de obedecer y pagar tributo a los reyes y al Papa. Durante ese largo periodo de la historia, conocido como Edad Media, la idea de Aristóteles de que la forma puede cambiar sin que cambie la materia, se utilizó para explicar porqué la hostia, que se supone es la carne de Cristo, mantiene el sabor del pan.



**Figura 4: Salud, dinero y amor, las motivaciones más poderosas de los seres humanos, impulsaban a los alquimistas a esforzarse en alcanzar su objetivo.**

De acuerdo a Aristóteles, el plomo y el oro estaban hechos del mismo tipo de materia, pero su forma era diferente. Era factible entonces despojar al plomo de sus cualidades e imponerle las cualidades del oro, realizando así la *transmutación* del plomo en oro. A aquellos que se afanaron por lograr esta proeza se les llamó *alquimistas*. La Alquimia se remonta al antiguo Egipto y se extendió por muchas culturas como la china y la árabe. Los alquimistas estaban en la búsqueda de una cierta sustancia que se suponía ayudaba a despojar de sus cualidades a las otras sustancias. A esta sustancia privilegiada se le llamaba la  *piedra filosofal*. Además de la riqueza, los alquimistas también buscaban la curación de

las enfermedades y la neutralización del envejecimiento. Por eso, otro nombre para la piedra filosofal era el *elixir de la vida*.

La piedra filosofal prometía salud y dinero, que son dos motivaciones poderosas para los seres humanos. No es de extrañarse que alrededor del mundo surgieran gran cantidad de alquimistas. En su empeño, los alquimistas tenían a su disposición toda una serie de técnicas para la descomposición de sustancias que se habían desarrollado previamente con fines estrictamente prácticos. A pesar de haber fracasado en su meta final, el trabajo incansable de los alquimistas consiguió que mejoraran estas técnicas y que crearan muchas otras nuevas. Estas novedosas técnicas encontraron a su vez aplicaciones prácticas en las diversas tecnologías de la época. Como diría Adam Smith: la riqueza de las naciones no es el oro, sino el trabajo.

A pesar de tantos avances tecnológicos conseguidos involuntariamente, es claro que el objetivo principal no se logró. ¿Por qué ocurrió así? Las grandes empresas no pueden realizarse en solitario: la cooperación es indispensable. También se requiere tiempo, que puede ser mucho más que el tiempo de vida de un ser humano. Hubiera sido conveniente que los alquimistas compartieran sus resultados y redactaran escritos entendibles en los que las nuevas generaciones pudieran basarse para no tener que empezar desde el principio. Pero los alquimistas trabajaban aislados y en el más absoluto secreto, quizás porque no querían compartir sus hallazgos con nadie o más probablemente porque su práctica era considerada un delito que ameritaba la pena de muerte. Esta falta de comunicación facilitaba la labor de los charlatanes, quienes contribuían a enrarecer mucho más el ambiente.

A pesar de todo, hubo muchos alquimistas que se atrevieron a publicar sus resultados. En los raros casos en que alguien lograba burlar las prohibiciones y conseguía un ejemplar de un texto sobre alquimia, se encontraba con que, a falta de una nomenclatura fija, la obra era prácticamente incomprendible. Por ejemplo, los alquimistas medievales tenían su propio juego de dos elementos: *Mercurio* y *Azufre*. Sin embargo, no se estaban refiriendo a sustancias reales, sino a sustancias “filosóficas” o “principios”: el Mercurio representaba el principio de lo metálico, mientras que el Azufre representaba el principio de la combustibilidad. En el siglo XVI, un destacado aunque extravagante alquimista que se hacía llamar Paracelso, se dio a la tarea de aplicar la alquimia a la medicina. Mientras trabajaba en este sentido, añadió un tercer elemento filosófico: la *Sal*, que sería el principio del sabor. A los tres elementos de Paracelso, Mercurio, Azufre y Sal, se les conoce como *Tria Prima*.

#### **4. Nace una nueva ciencia**

El siglo XVII empezó con la cruel ejecución de Giordano Bruno, quien fue llevado a la hoguera por afirmar, entre otras cosas, que una hostia consagrada sólo podía saber a pan si estaba hecha de átomos de pan y que si se decía que era la carne de Cristo, se estaba hablando sólo en sentido figurado. No fue mucho después de este terrible suceso que Pierre Gassendi se dio a la tarea de cristianizar a los átomos. Para esto, modificó la teoría original, asegurando que los átomos no se mueven por sí mismos sino por obra de Dios. La labor de Gassendi fue tan exitosa que muchos de sus piadosos contemporáneos llegaron a ser fervientes atomistas, como Isaac Newton y Robert Boyle. A Gassendi también le debemos la idea de que los átomos pueden a veces unirse para formar partículas intermedias, y que estas partículas intermedias son los bloques con los cuales se construyen muchas de las

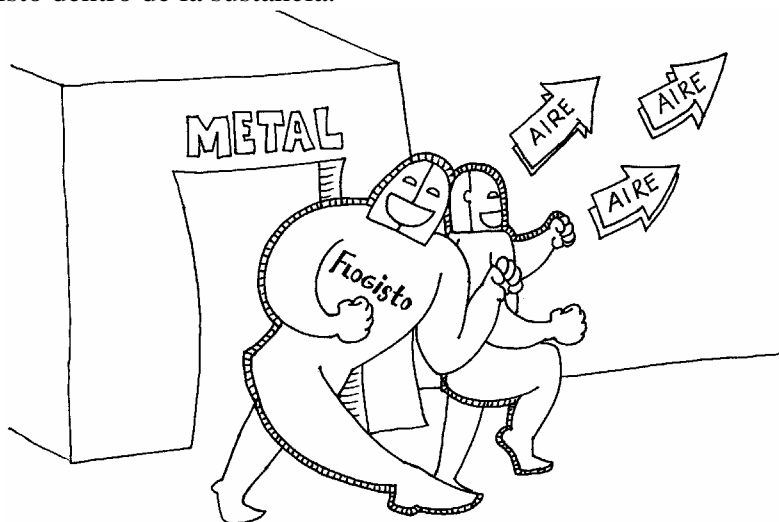
sustancias que conocemos. A estas partículas secundarias, que a diferencia de los átomos, resultan divisibles, Gassendi les llamó *moléculas*.

Por aquel entonces, los alquimistas dejaban poco a poco de dar vueltas en círculos y empezaban a marchar al frente con paso lento pero seguro. Aunque los antiguos griegos creían que la tierra era un elemento, Johann Joachim Becher se dio cuenta de la existencia de al menos tres diferentes tipos de “tierras. Encontró una tierra de la que pueden extraerse metales, otra que sirve para fabricar vidrio y otra más que es combustible. Esta última se asoció con el principio de la combustibilidad o azufre filosófico. Sin embargo, Becher prefirió llamarle *flogisto*.

Fue el inglés Robert Boyle quien emprendió la descomunal tarea de revisar todo el saber alquímico y verificarlo experimentalmente. Como era de esperarse, encontró que la mayoría de los experimentos descritos no eran repetibles y que sus interpretaciones eran poco claras y cuestionables. Sin embargo, de entre esa maraña de nomenclaturas ambiguas y resultados dudosos, consiguió encontrar unos pocos experimentos que sí pudo reproducir. El que un experimento fuera repetible demostraba que era digno de ser tomado en serio. Este *método experimental* limpió el camino y a partir de este momento, la alquimia estuvo en camino de convertirse en la ciencia que hoy conocemos como *química*.

## 5. La teoría del flogisto

A principios del siglo XVIII, el químico Georg Ernst Stahl, retomó el concepto de flogisto y lo usó para explicar la combustión. De acuerdo a Stahl, la combustión no es más que la salida del flogisto de una sustancia. Por eso, para que una sustancia pueda quemarse debe contener flogisto. Las sustancias con mucho flogisto son altamente combustibles mientras que las que tienen poco o nada, no lo son. Las cenizas, o como le llamaba Stahl, *cales*, son lo que queda de una sustancia después de que el flogisto ha salido. Durante la combustión, el aire circundante absorbe el flogisto hasta que se satura y no puede absorber más. Cuando el aire está saturado de flogisto, ya no puede permitir la combustión, aún cuando siga existiendo flogisto dentro de la sustancia.



**Figura 5:** Para Georg Ernst Stahl, un metal es un compuesto de mineral y flogisto. Si el flogisto sale del metal y es absorbido por el aire, lo que queda es el mineral.

La misma teoría puede explicar la obtención de metales. Para Stahl, los minerales son cal y un metal es un compuesto formado por una cal y flogisto. Por tanto, para sintetizar un metal, basta con calentar la cal, proceso que le añade flogisto. La corrosión es el proceso inverso y es análoga a la combustión. El paso del tiempo permite que el flogisto de la superficie metálica, que fue añadido artificialmente, sea absorbido por el aire. La salida del flogisto de la superficie, deja atrás a la herrumbre, que es también una cal.

Las aportaciones de Stahl incluyen también un extenso trabajo de clasificación de sustancias, con especial énfasis en las sales. La antigua idea de que la tierra era un elemento había quedado completamente obsoleta con la identificación de diversos *metales*, *ácidos* y *álcalis*. El descubrimiento de que un ácido y un álcali, sustancias de propiedades diametralmente opuestas se unen para producir una sal, desconcertó a muchos, ya que se suponía que los átomos se unían de acuerdo a sus semejanzas. Algunos plantearon que era todo lo contrario: los átomos se unen de acuerdo a sus propiedades opuestas. Por ejemplo, los átomos de ácido tienen puntas y los de álcali receptáculos. Cuando se unen, la punta se oculta en el receptáculo y tanto las propiedades de ácido como las de álcali quedan enmascaradas.

Durante el siglo XVIII, fue mucho lo que se adelantó en la clasificación de las sustancias sólidas o “tierras”. El estudio de los diferentes “aires” avanzó un poco más lentamente, pero pronto se encontró evidencia de que el aire tampoco podía ser un elemento. Mientras Joseph Black calentaba una sustancia sólida llamada *magnesia alba*, se dio cuenta de que en el proceso se emitía un “aire” que no era bueno para respirar, ni permitía la combustión. Por el hecho de haber estado originalmente fijo dentro de un sólido, Black llamó a esta sustancia “aire fijo”.

Por otra parte, mientras Joseph Priestley calentaba una sustancia llamada *cal de mercurio*, detectó la liberación de otro aire que era mucho más que bueno para respirar. De hecho, provocaba en quien lo respiraba un estado de agitación. Además, podía revivir a un animal recientemente asfixiado o avivar una llama casi extinguida. Debido a sus propiedades, esta nueva sustancia fue bautizada como “aire vital”. Poco después, Henry Cavendish logró identificar un “aire explosivo” que al combinarse con el aire vital, produce agua.

Joseph Priestley demostró que el aire que queda después de una combustión o una respiración es “aire fijo”. A Priestley le pareció que la respiración y la combustión son análogas, de modo que planteó que la respiración animal no es más que la liberación de flogisto. El “aire fijo” no es más que aire saturado con flogisto y es por eso que no sirve para respirar. El “aire vital” es aire completamente sin flogisto y por eso es excelente para el mismo propósito. Priestley encontró también que el “aire fijo” puede volverse saludable por acción de vegetales en crecimiento. Por eso, planteó que el crecimiento vegetal consiste de la absorción de flogisto, y es por tanto complementario a la respiración animal.

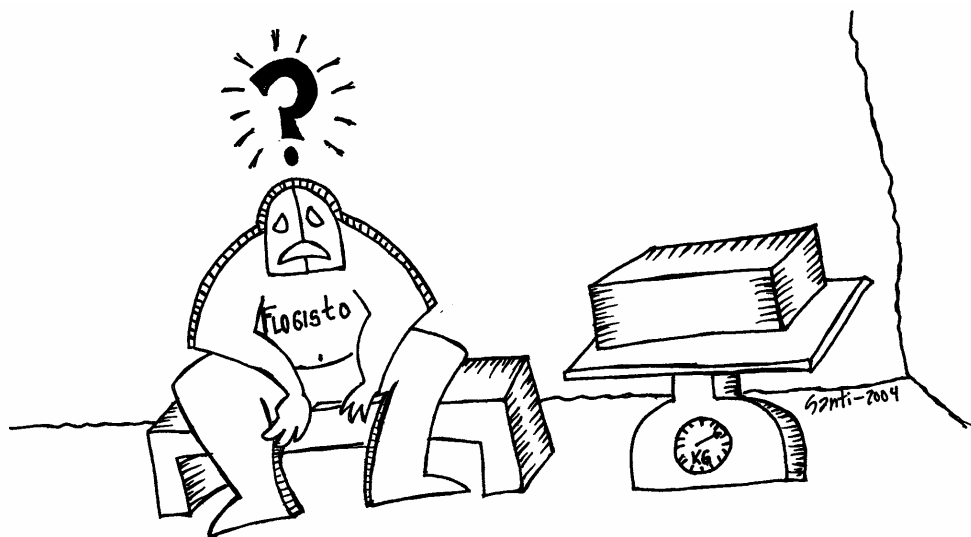
La teoría del flogisto fue muy exitosa, ya que podía explicar una gran variedad de fenómenos por medio de unas pocas proposiciones sencillas. Henry Cavendish utilizó también esta teoría para explicar la producción de agua. Para él, el aire vital no era “aire sin flogisto” sino “agua sin flogisto” y el aire explosivo era nada más y nada menos que el mismísimo flogisto. Cuando estos dos aires se combinaban, el aire vital recuperaba su flogisto, convirtiéndose de nuevo en agua.

## **6. La revolución de Lavoisier**

Sin embargo, había llegado el momento en que la química tenía que volverse cuantitativa y la teoría del flogisto no pudo cumplir con los nuevos estándares. Si en una transformación o *reacción química* se mide con cuidado el peso de las sustancias originales o *reactantes* y el de las sustancias que resultan o *productos*, puede verificarse que la suma de las masas de los productos es siempre igual a la suma de las masas de los reactantes. Fue Antoine Lavoisier quien enunció este hecho como la *ley de la conservación de la masa*.

La ley de la conservación de la masa puede darnos una medida de la precisión con que un químico maneja una reacción determinada. Todos sabemos que un mecánico a quien le sobran piezas después de reparar un automóvil, no es un buen mecánico y que un contador que no puede igualar ingresos con egresos no es un buen contador. Pues bien, si en una cierta reacción, la suma de las masas de los reactantes no resulta igual a la suma de las masas de los productos, podemos saber que hay una sustancia perdida y que el experimento está mal hecho.

Al medir cuidadosamente las masas de reactantes y productos en un proceso de combustión, Lavoisier encontró que las “cales” o cenizas, tienen más masa que la sustancia original. Si la combustión es la salida de flogisto, ¿porqué esta salida añade masa en vez de restarla? Este resultado debilitó la teoría del flogisto, aunque hubo quienes intentaron rescatarla postulando que el flogisto es una extraña sustancia con masa negativa. Sin embargo, en la ciencia, las explicaciones complicadas no son bienvenidas. La teoría del flogisto había dejado de ser la teoría más sencilla posible y por lo tanto, había terminado su ciclo.



**Figura 6:** Cuando, gracias a Lavoisier, la química se volvió más cuantitativa, ya no quedó lugar para el viejo concepto de flogisto.

Controlar la masa de las sustancias resultaba particularmente difícil cuando las reacciones incluían gases. Para Lavoisier, esto ya no era aceptable, así que para resolver el problema diseñó el *gasómetro*, un instrumento que sirve para confinar y pesar con precisión a cualquier gas. Equipado con su flamante instrumento, Lavoisier pudo determinar que el “aire vital” entraba en composición con otras sustancias para formar distintos ácidos. Ya que no tenía ninguna razón para suponer que el aire vital fuera un compuesto, lo consideró un elemento y lo bautizó como *oxígeno*, que quiere decir “formador de ácidos”.

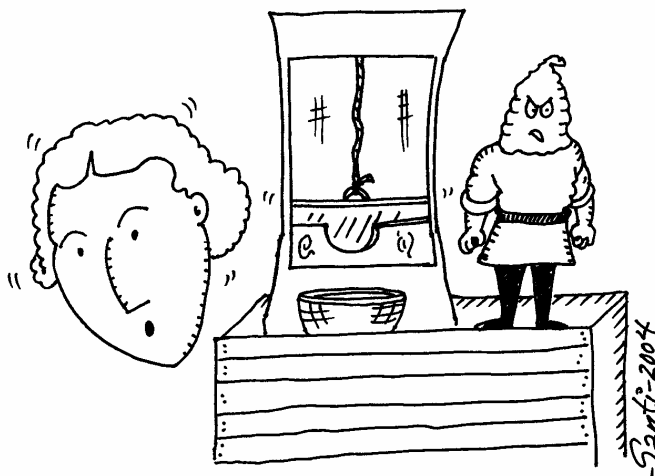


Por medio de cuidadosas mediciones, Lavoisier pudo determinar que la combustión consiste en la combinación de una sustancia con el oxígeno, que resulta en la formación de una ceniza o cal. De acuerdo a este nuevo esquema, Lavoisier rebautizó a las cales y las llamó *óxidos*. Obviamente, tanto los minerales de donde se extraen los metales, como la herrumbre, son también óxidos. En la fundición, calentamos un óxido de hierro para liberar el oxígeno y quedarnos con el hierro que es lo que nos interesa. Con el tiempo, la superficie del hierro se corroe por acción del oxígeno en el aire formando otra vez óxido de hierro, es decir, herrumbre. Es por esto que hoy en día, en el lenguaje popular, los términos oxidación y corrosión se usan muchas veces como sinónimos.

Lavoisier dio también una nueva explicación para la reacción de producción de agua. Ya que no había ninguna razón para suponer que el “gas explosivo” fuera un compuesto, Lavoisier lo consideró un elemento y lo bautizó como *hidrógeno*, que quiere decir formador de agua. En cuanto al “aire fijo”, Lavoisier logró determinar que es en realidad un compuesto formado por carbono y oxígeno, esto es, un óxido de carbono.

Lavoisier inició una lista nueva de elementos, en la que incluyó todas las sustancias que no pudo separar en componentes más fundamentales. Sin embargo, él insistía en que se considerara esta lista provisional, ya que futuros avances podrían lograr la descomposición de nuevas sustancias. En la lista estaban los álcalis *sosa*, *potasa* y un misterioso gas verde que se combina con hidrógeno para formar ácido muriático. Lavoisier tenía la corazonada de que, en realidad, estas tres sustancias eran compuestos. En particular, ya que creía que el oxígeno era el formador de ácidos por excelencia, suponía que el gas verde era en realidad el óxido de una sustancia hasta el momento desconocida.

De la antigua lista de elementos, el fuego representa un caso especial. El fuego no es precisamente una sustancia como nosotros lo entendemos, aunque es cierto que el calor es un participante importante en muchas reacciones químicas. El flogisto había dado cuenta de esta participación, pero ahora que había revelado su inconsistencia se requería de otra forma de tomar en cuenta el calor que se absorbe o libera en una reacción química. Con este propósito, Lavoisier planteó la existencia de una sustancia sin masa a la que llamó *calórico*. Para satisfacer los nuevos estándares, la cantidad de calórico participante en una reacción debía ser estrictamente cuantificada. Para lograr esto, Lavoisier diseñó el *calorímetro de hielo*, el cual mide la cantidad de hielo que el calor es capaz de derretir.



**Figura 7: Un régimen de terror, al que no le interesaba mucho la química, condenó a Lavoisier a la guillotina en 1794.**

El calorímetro, el gasómetro y la balanza ultra-precisa, fueron los tres instrumentos que cambiaron por completo la forma de hacer química y los tres fueron diseñados por Lavoisier. Es difícil argumentar en contra de que se le considere el padre de la química moderna. No obstante, Lavoisier tuvo la mala suerte de no ser del agrado del gobierno francés durante el llamado Reino del Terror que siguió a la revolución francesa. Así fue como el científico que revolucionó la química fue guillotinado en 1794 por órdenes de un gobierno que se hacía llamar revolucionario. La verdad es que los poderosos siempre son un peligro, ya sea que actúen en nombre de Dios o que afirmen luchar por la Libertad, la Igualdad y la Fraternidad.

## 7. El retorno de Epicuro

Para los tiempos de Lavoisier, la teoría de los átomos había dejado de considerarse pecaminosa. Sin embargo, se consideraba fantástica y anticuada. Los científicos de aquellos tiempos estaban orgullosos de haber dejado atrás las falsas ideas de Platón, Aristóteles, Empédocles y muchos otros. Las ideas de los filósofos griegos, que antes inspiraban reverencia ahora se veían con burla y desprecio. No había razón para que las ideas de Demócrito y Epicuro recibieran un trato diferente. Así fue como la teoría de los átomos fue por un tiempo relegada, aunque esta situación no estaba destinada a durar mucho tiempo.

Las estrictas mediciones de Lavoisier habían conseguido que se obtuvieran recetas precisas de cómo formar una infinidad de compuestos. Por ejemplo, podía obtenerse “aire fijo”, combinando 3g de carbono con 8 g de oxígeno. Como en las instrucciones para hacer *Hot Cakes*, es fácil cambiar las cantidades mientras las proporciones se mantengan constantes. Por ejemplo, la receta anterior puede convertirse sin problemas en 6g de carbono con 16 g de oxígeno. A este hecho se le conoce como *ley de las proporciones constantes*.

Carbono	Oxígeno
3g	8g
6g	16g
9g	24g
12g	32g
15g	40g

**Tabla 1: Ley de las proporciones constantes. Mientras se respete la proporción 3:8, las cantidades de carbono y oxígeno pueden cambiarse y dar como resultado la misma sustancia.**

En muchas ocasiones, se lograron encontrar distintas recetas que involucran a los mismos elementos. En la Tabla 2 se describen las dos formas en que se pueden combinar el carbono y el oxígeno mientras que en la Tabla 3, se describen dos formas de combinar hidrógeno y oxígeno. En la Tablas 4 y 5 se describen las distintas formas que se tienen de producir los distintos óxidos de hierro y cobre.

Carbono	Oxígeno
3g	4g
3g	8g

**Tabla 2: Hay dos formas de combinar el carbono con el oxígeno que llevan a la formación de dos sustancias diferentes.**

Hidrógeno	Oxígeno	Nombre común
1g	8g	Agua
1g	16g	Agua oxigenada

Tabla 3: Hay dos formas de combinar hidrógeno y oxígeno, una que resulta en agua y la otra en “agua oxigenada”

Hierro	Oxígeno		Hierro	Oxígeno
7g	2g	×3	21g	6g
21g	8g	×1	21g	8g
7g	3g	×3	21g	9g

Tabla 4: Tres formas distintas de combinar el hierro con el oxígeno, que resultan en tres óxidos diferentes.

Cobre	Oxígeno		Cobre	Oxígeno
8g	1g	×1	8g	1g
4g	1g	×2	8g	2g
8g	3g	×1	8g	3g

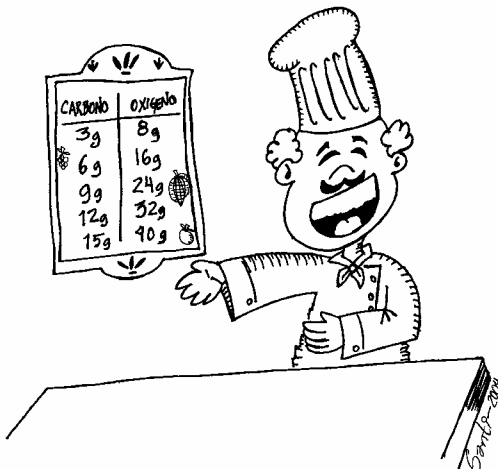
Tabla 5: Tres formas distintas de combinar el cobre con el oxígeno, que resultan en tres óxidos diferentes.

Tanto en la Tabla 2 como en la Tabla 3, la cantidad en la columna izquierda, que representa la cantidad de carbono e hidrógeno respectivamente, permanece constante. En las Tablas 4 y 5 se muestra como cualquier tabla que no tenga esta característica, puede convertirse en una que sí, utilizando la ley de las proporciones constantes. Es en este tipo de tablas, que representan las diferentes formas de combinar una masa fija de un elemento con diferentes masas de otro, donde John Dalton encontró interesantes regularidades.

Por ejemplo, en la Tabla 2 puede verse que 3g de carbono se pueden combinar con 4g y 8g de oxígeno respectivamente, cantidades que están en proporción 1:2. En la Tabla 3 puede verificarse que 1g de hidrógeno puede combinarse con 8g y 16g, cantidades que también están en la misma proporción. Los datos ajustados de las Tablas 3 y 4 dan la cantidad de oxígeno que se combina con 21g de hierro y 8 g de cobre. De estas tablas puede verse con facilidad que las cantidades de oxígeno que se combinan con hierro están en la proporción 6:8:9, mientras que las que se combinan con cobre están en proporción 1:2:3. En todos estos casos, y muchos otros, los cocientes están siempre formados de números enteros y pequeños. A este hecho se le llama *ley de las proporciones múltiples*.

Para Dalton, la ley de las proporciones múltiples puede explicarse con facilidad si se acepta la existencia de átomos. Dalton asignó a cada átomo un símbolo gráfico, pero al final, los impresores prefirieron reemplazar estos símbolos por letras. En muchos casos, el símbolo del elemento no es más que la inicial de su nombre. Por ejemplo, el hidrógeno es H, el carbono, C, el nitrógeno, N y el oxígeno O. En otros casos se utilizan dos letras, que pueden provenir del nombre del elemento en español o en latín. Por ejemplo, los símbolos del hierro y el cobre son Fe y Cu, las dos primeras letras de *ferrum* y *cuprum*.

La explicación de Dalton sobre la ley de las proporciones múltiples es que si sabemos que las cantidades de oxígeno que se combinan con 3g de carbono están en proporción 1:2, quiere decir que en el primer caso un átomo de carbono se une con otro de oxígeno y en el segundo caso, un átomo de carbono se une con dos átomos de oxígeno. Las fórmulas químicas de los así llamados *monóxido de carbono* y *dióxido de carbono* se representan por CO y CO<sub>2</sub>, respectivamente. Para Dalton, estas fórmulas describen explícitamente la constitución de las moléculas, las partículas mínimas que mantienen las propiedades del compuesto. Aunque algunos no estuvieron de acuerdo con esta interpretación, recibieron las fórmulas con los brazos abiertos, ya que simplificaban notablemente el trabajo.



**Figura 8: Sin el concepto de átomo, la química no se distingue mucho de la cocina.**

No obstante, la creación de estas fórmulas no es tan evidente. Lo que la ley de las proporciones múltiples establece es que las proporciones de oxígeno en el monóxido y el dióxido de carbono están en proporción 1:2. Esto es consistente con las fórmulas CO y CO<sub>2</sub>, pero también con CO<sub>2</sub> y CO<sub>4</sub> o con C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y C<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. Para resolver esta ambigüedad, Dalton buscó escoger siempre las fórmulas más sencillas. De acuerdo a su *hipótesis de simplicidad*, a menos que algo lo hiciera suponer lo contrario, siempre consideraba que en el compuesto más sencillo, los átomos se combinaban en proporción 1:1.

Utilizando esta hipótesis, si suponemos que la fórmula química del compuesto formado por 7g de hierro y 2g de oxígeno es FeO, podemos fácilmente deducir las fórmulas de los otros óxidos como se describe a continuación.

$Fe_m O_n$	$Fe_m O_n$
$\frac{m \cdot 7}{n \cdot 2} = \frac{21}{8}$	$\frac{m \cdot 7}{n \cdot 2} = \frac{7}{3}$
$m = 3$	$m = 2$
$n = 4$	$n = 3$
$Fe_3 O_4$	$Fe_2 O_3$

Del mismo modo, si suponemos que la fórmula química del compuesto formado por 4g de cobre y 1g de oxígeno es CuO, podemos también deducir las fórmulas de los tres óxidos de cobre.

$$\begin{array}{rcl}
 Cu_m O_n & & Cu_m O_n \\
 \frac{m}{n} \cdot \frac{4}{1} = \frac{8}{1} & & \frac{m}{n} \cdot \frac{4}{1} = \frac{8}{3} \\
 m = 2 & & m = 2 \\
 n = 1 & & n = 3 \\
 Cu_2 O & & Cu_2 O_3
 \end{array}$$

Es interesante notar que de acuerdo a la hipótesis de simplicidad de Dalton y a los datos de la Tabla 3, nos vemos obligados a considerar la fórmula del agua como HO\* y la fórmula del “agua oxigenada” como HO<sub>2</sub>.

El potencial de las fórmulas químicas no se reduce a servir como taquigrafía, sino que nos puede proporcionar mucha más valiosa información. Si aceptamos la interpretación de Dalton de que una fórmula química describe la composición de una molécula, podemos calcular la proporción de las masas de diferentes átomos. Por ejemplo, utilizando la fórmula del monóxido de carbono podemos deducir que la masa del átomo de oxígeno es mayor que la del átomo de carbono en una proporción 4:3. Utilizando el mismo procedimiento y la fórmula HO, nos vemos obligados a concluir también que la masa del oxígeno es 8 veces mayor que la del hidrógeno.

Para tener un estándar, se acordó llamar *masa atómica*, a la proporción de la masa de un átomo con respecto a la masa del átomo de hidrógeno. Obviamente, al ser la referencia, la masa atómica del hidrógeno quedó asignada automáticamente como 1 unidad de masa atómica (uma). De acuerdo a esto, nos vemos obligados a concluir que la masa atómica del oxígeno debe ser de 8 umas. Combinando la masa del oxígeno con la proporción 4:3 podemos deducir también la masa del carbono como de 6 umas. Del mismo modo, utilizando las recetas para la formación de FeO y CuO, y la masa calculada para el oxígeno, podemos encontrar las masas atómicas del Fe y del Cu como 28 umas y 32 umas respectivamente.

## Epílogo

Es importante aclarar que la hipótesis de simplicidad no tiene ningún sustento. De hecho, si esta hipótesis no fuera correcta, la fórmula calculada por este medio estaría equivocada. Así mismo, cualquier valor de masa atómica calculado a partir de esta fórmula incorrecta, sería incorrecto también. Además, si un valor de masa atómica erróneo se usa para deducir otras masas atómicas, éstas también serán erróneas y así sucesivamente. Este endeble edificio estaba destinado a desmoronarse. Para saber como ocurrió esto, será necesario leer la segunda parte de esta historia.

---

\* El lector notará que la fórmula del agua se considera actualmente como H<sub>2</sub>O. Para entender como se llegó a este resultado, no debe dejar de leer la sección 9. La fórmula del agua oxigenada también ha cambiado y se considera actualmente como H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.