

## INTRODUCCIÓN

# La química, una ciencia



### TEMARIO

CON ESCEPTICISMO: Entre los dos extremos del cosmos: ¿cómo conocemos? 1

LA CIENCIA 2

Ciencia y metaciencia 3

Los procesos de pensamiento de los científicos 4

La validez de la ciencia, en tela de juicio 4

QUÍMICA 7

Química, ¿benefactora... 7

TE TOCA A TI: Fertilizantes, lo bueno y lo malo 10

...o villana? 11

EN EQUIPO: Química, ¿benefactora o villana? 13

PROBLEMAS Y ACTIVIDADES 13

BIBLIOGRAFÍA 14



CON ESCEPTICISMO:<sup>1</sup>

### Entre los dos extremos del cosmos: ¿cómo conocemos?

Un bote de vela. Una mujer en la cubierta. Un mosquito sobre la mano de ella.

La cámara se acerca y enfoca al mosquito. Sigue aproximándose. El mosquito se ve enorme. Alcanzamos a percibir la fina y ramificada estructura de sus alas.

La cámara entra en una de ellas. Vemos las células y, dentro de ellas, muchas estructuras: el citoplasma, el núcleo celular, las vacuolas... Más allá, moléculas proteicas formadas por átomos. En los átomos vemos el núcleo, con protones y neutrones, y, rodeándolo, la nube de los electrones.

Repentinamente la cámara se detiene y comienza a alejarse. Volvemos al bote de vela, la mujer en él, el mosquito sobre la mano de ella. La cámara se aleja más, no se detiene. Alcanzamos a ver el lago en el que flota el bote y en su orilla un pueblo, el pueblo en un continente de la Tierra, la Tierra en el Sistema Solar, el Sistema Solar en la Vía Láctea... La cámara se retira aún más, detecta las galaxias... Finalmente, se detiene. Regresa al bote de vela, la mujer en la cubierta, el mosquito sobre la mano de ella.



**Figura 0.2**

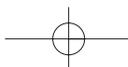
Mosquito visto por un microscopio electrónico.



**Figura 0.1**

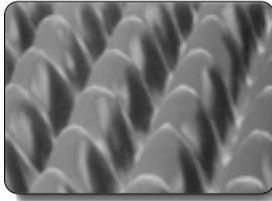
El barco y la mujer.

<sup>1</sup> La sección llamada "CON ESCEPTICISMO" contiene más preguntas que respuestas. Su objetivo es promover la indagación, hacer preguntas como las que hacen los científicos. Los descubrimientos inician por lo general con una buena pregunta.



## 2 PRIMERA PARTE

### Manifestaciones de la materia



**Figura 0.3**  
Átomos de níquel.



**Figura 0.4**  
El planeta Tierra.

Esta toma hipotética e imposible, aunque nos parezca plausible a pesar de nunca haberla visto, sugiere que aceptamos que el ser humano se encuentra en un punto medio entre lo más pequeño y lo más grande del Universo, entre los llamados “microcosmos” y “macrocosmos”. Esto es lo que hemos aprendido desde niños, si hemos creído lo que indican las evidencias indirectas y las mediciones directas realizadas hasta la fecha con equipos especializados. Pero siempre nos quedan dudas: ¿realmente existen los átomos? ¿La vida del mosquito se debe ciertamente a las propiedades de replicación de ciertas moléculas y a un estado de desequilibrio promovido por reacciones químicas? ¿De verdad las estrellas están tan lejos? ¿Vivimos en un Universo que se expande?

Pasa por nuestra cabeza la idea de lo relativas que pueden ser estas “verdades”. Eso, que hemos aprendido, ¿será cierto? ¿No será producto de las limitaciones del ser humano, de su imperfecta “visión”? ¿Ciertamente existen cosas mucho más pequeñas que nosotros, que no alcanzamos a percibir con los sentidos? ¿Por qué tenemos que confiar en los aparatos? ¿Por qué tenemos que confiar en las leyes científicas? ¿Por qué hay leyes y teorías para describir el mundo macroscópico y otras para el microscópico? ¿Las leyes de ambos dominios son diferentes debido a que la naturaleza no se comporta igual en el microcosmos que en el macrocosmos? ¿Será que dichas leyes están incompletas, que aún no lo hemos descubierto todo? ¿Llegaremos alguna vez a conocer lo que realmente ocurre, a tener verdades absolutas acerca del comportamiento de la naturaleza?

Si la humanidad ha tratado de ampliar sus formas de percibir el mundo es porque ésa es una forma de conocerlo. A la especie humana le gusta indagar, actividad posible gracias al complicado cerebro que le legó la evolución. Pero ¿qué tanto las interpretaciones de lo observado dependen de la persona que mira y de lo que ya cree saber previamente? ¿No es cierto que, después de un asalto, hay varias interpretaciones diferentes de lo que sucedió, según el testigo al que se le pregunte? ¿Cómo hacen los científicos para evitar ese sesgo? En breve, ¿cómo conocemos mediante la ciencia?

## LA CIENCIA



**Figura 0.5**  
Ruy Pérez Tamayo, patólogo mexicano dedicado también al estudio de la filosofía de la ciencia.

*El espacio de Einstein no está más cerca de la realidad que el cielo de Van Gogh. La gloria de la ciencia no estriba en una verdad más absoluta que la verdad de Bach o Tolstoi sino que está en el acto de la creación misma. Con sus descubrimientos, el hombre de ciencia impone su propio orden al caos, así como el compositor o el pintor impone el suyo: un orden que siempre se refiere a aspectos limitados de la realidad y se basa en el marco de referencias del observador, marco que difiere de un periodo a otro, así como un desnudo de Rembrandt difiere de un desnudo de Manet.*

Arthur Koestler

Ciencia es la palabra latina equivalente a “conocimiento”; no es más que un modo específico de ampliar, organizar y renovar la experiencia humana. Ruy Pérez Tamayo aporta la siguiente propuesta para definir la ciencia:

*Actividad humana creativa cuyo objetivo es la comprensión de la naturaleza y cuyo producto es el conocimiento, obtenido por medio de un método científico organizado en forma deductiva y que aspira a alcanzar el mayor consenso posible.*

Si se define la palabra cultura como “aquello que una sociedad sabe, hace y comparte”, sin lugar a dudas la **ciencia** es una pieza de la cultura de una sociedad, pues forma parte de sus saberes, de su práctica y de lo aceptado por consenso, al menos por el consenso de los expertos.

## Ciencia y metaciencia

El ser humano tiene y ha tenido la necesidad ancestral de conocer, aprovechar y respetar el mundo que lo rodea, lo que lo ha llevado a tratar de organizar y ampliar el conocimiento de la naturaleza y de los fenómenos que en ella ocurren. Para lograrlo ha empleado diversos acercamientos, primero precientíficos y luego científicos.

Daniel Boorstin, bibliotecario emérito del Congreso estadounidense propone tres períodos diferenciados en los que la civilización occidental ha intentado acercarse al conocimiento.

1. El primero es el de los profetas y los filósofos: unos tras la búsqueda de canales hacia la “Voz Superior”, los otros en labor de parir las voces humanas interiores. Los profetas indagaban el mensaje divino, eran los reveladores del propósito de Dios, mientras que para los filósofos griegos la búsqueda fue más allá de la divinidad, con base central en el razonamiento puro.

En el México prehispánico, existía el convencimiento de que la lluvia se debía al dios Tláloc (ver figura 0.6) y, por lo tanto, que de él dependía el éxito de las cosechas. En el Perú, entretanto, las divinidades eran el Sol, Inti, y la Tierra, Pachamama. Los antiguos pobladores del continente adoraban a estas deidades, entre otras, para intentar garantizar su bienestar.

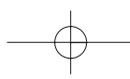
2. El segundo período de búsqueda propicia la civilización actual, ya que su propósito es develar el papel del hombre en la sociedad. En este tiempo de grandes descubrimientos geográficos, “civilizar” es el significado y el propósito de la comunidad. Los enciclopedistas franceses propician el clímax de ese proceso civilizatorio que se inicia en Grecia, continúa en Roma, y desemboca en el Renacimiento y en la filosofía racional europea.
3. El tercer período es el contemporáneo, dominado por la ciencia y la tecnología como instrumentos de búsqueda, en el cual surgió la química como ciencia, el objeto de estudio de este libro.

Si bien las creencias mágicas o religiosas no estaban basadas en conocimiento científico alguno, tenían igualmente la motivación de explicar y predecir los fenómenos naturales, de conocer sus causas, para así tratar de mejorar las condiciones de vida. Esa misma necesidad es la que se tiene cuando se procura predecir el futuro. Pero, otra vez, la astrología no tiene fundamentos científicos. Entonces, ¿qué es lo que distingue un conocimiento científico de uno que no lo es?

La diferencia entre la actividad científica y la que no lo es, estriba en su reproducibilidad y en su capacidad de predicción. Para entender mejor, tomemos el ejemplo de la astrología. Es posible que un lector de la carta astral de algún sujeto que nació bajo el signo de Piscis con ascendente en Leo “diga” que se ganará una fortuna. Sin embargo, sabemos que esto puede ocurrir, o no. En efecto, algunos pocos Piscis-Leo tendrán suerte en algún sorteo en su vida, pero lo más probable es que ello no suceda en la mayoría de los casos. A veces los astrólogos aciertan debido a la vaguedad, ambigüedad y generalidad de sus afirmaciones, lo que no quiere decir que tengan poder predictivo. Leer en el horóscopo del día que los Tauro encontrarán la felicidad o el amor, es algo sumamente ambiguo.



**Figura 0.6**  
Tláloc. Divinidad de la lluvia del México precortesiano.

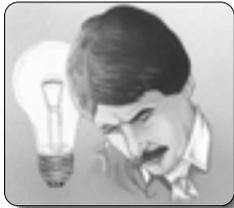


## 4 PRIMERA PARTE Manifestaciones de la materia

Así, aunque existan algunos Tauro afortunados ese día, no se puede garantizar que se repita el hecho ni que ocurra para todos los de ese signo. A diferencia, un conocimiento científico se basa en múltiples observaciones controladas y rigurosas que se han cumplido siempre que el experimento se realiza bajo las mismas condiciones. La capacidad de predicción hace que los sucesos científicamente explicados no sean casuales, sino que se puedan comprobar y repetir cuantas veces se desee.

### Los procesos de pensamiento de los científicos

Son variadas las aproximaciones que se usan en ciencia para acercarse al conocimiento. No es posible establecer unas reglas simples que describan lo que ha dado en llamarse “el método científico”. Éste cambia de un hallazgo a otro, de una comunidad científica a la otra, de una época a otra, de una rama de la ciencia a otra. No hay un método de la ciencia, sino muchos. Sin embargo, y sólo a manera de ejemplo, una aproximación factible en ciencia se presenta en las siguientes líneas (ver figura 0.7):



a) Una buena pregunta y una buena respuesta



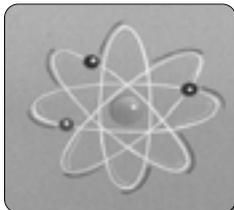
b) Observación del sistema



c) Búsqueda de patrones



d) Establecimiento de leyes



e) Construcción de modelos y teorías



f) Predicciones a partir de la teoría

1. Lanzar una buena pregunta sobre algún hecho natural; es decir, tener una buena **hipótesis**.
2. Hacer observaciones controladas y rigurosas, al concentrarse en una pequeña porción del Universo, llamada “sistema”, aislada para su estudio.
3. De un conjunto de observaciones puede derivarse una **ley** acerca de su comportamiento, al identificar patrones que se repiten en los datos obtenidos.
4. Intentar construir un modelo del sistema y unas ecuaciones que describan y relacionen algunas de sus variables, hasta alcanzar una **teoría** sobre el objeto modelo.
5. Comparar los resultados teóricos con los experimentales para poner a prueba la validez de la teoría.
6. Si la comparación es exitosa, utilizar dicha teoría para hacer nuevas **predicciones** sobre el sistema, lanzar nuevas preguntas y hacer nuevas observaciones.

Cuando los sistemas no se pueden aislar o intentar reproducir una medición es imposible —como en la astronomía o en la paleontología, por ejemplo— el método anterior es inaplicable, pero es factible también plantear hipótesis, hacer numerosas observaciones, analizarlas y sacar conclusiones que puedan ser consideradas válidas por la comunidad científica. Es el respaldo de la comunidad internacional de científicos lo que da soporte a la validez de los conocimientos.

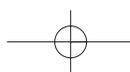
Ciertamente, las observaciones, leyes y teorías se refieren solamente al objeto bajo estudio. Por ejemplo, las leyes de Newton son válidas para describir los aspectos mecánicos del mundo macroscópico. Para el microscópico, son las ideas de los científicos del siglo XX las que prevalecen. Como producto de haber dividido al mundo en sistemas para su estudio, las leyes de ambos dominios resultan ser diferentes en ocasiones.

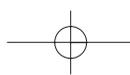
### La validez de la ciencia, en tela de juicio

A pesar del alto grado de confianza que tenemos en los conocimientos derivados de la ciencia no contamos con verdades ab-

**Figura 0.7**

Ejemplo de un procedimiento sistemático en el trabajo científico.





**Figura 0.8**

La ciencia nos ha enseñado a no confiar en el sentido común. La Tierra parece ser plana cuando vemos el horizonte.

solitas. El conjunto del saber de una época puede ser superado por los resultados de nuevas investigaciones, que conducen a la construcción de nuevas teorías que engloban a las anteriores y, en ocasiones, las invalidan.

Un ejemplo de ello es la teoría atómica. El átomo indivisible de Dalton se abandonó después de un siglo, al aparecer evidencia de partículas más ligeras: electrones, protones y neutrones. Lo que pudo explicarse con el átomo de Dalton se puede también entender con las teorías atómicas modernas, que a su vez esclarecen otros fenómenos que Dalton no había comprendido. El aparente carácter transitorio del conocimiento científico surge por la continua necesidad de renovarlo, refinarlo y ampliarlo.

En ocasiones, las explicaciones científicas van en contra de lo que nos dice el sentido común y por ello hay una gran resistencia para aceptarlas. Sin embargo, la experiencia ha demostrado en múltiples ocasiones que una actitud escéptica conduce, a la larga, a hallar nuevos conocimientos y nuevas interpretaciones. Como ejemplos de ello:

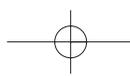
- Cuando vemos el horizonte, el sentido común nos dice que la Tierra es plana, que no puede ser redonda. Hoy tenemos muchas evidencias de lo contrario, pero fue crucial el primer viaje naval de circunnavegación como demostración irrefutable.
- El movimiento de la Tierra alrededor del Sol es otro fenómeno difícil de asimilar por cualquiera, ya que parece ser el Sol el que se mueve. Contra el esquema de Aristarco y Ptolomeo, que colocaba a la Tierra en el centro del Sistema Solar, Copérnico afirmó que ésta gira alrededor del Sol y Kepler se encarga de demostrarlo por la rigurosa observación de los planetas.
- La existencia de los átomos reta asimismo al sentido común. Nuestros cinco sentidos son demasiado “cortos” para que muestren evidencia alguna de que todos los objetos están finalmente compuestos de partículas; que la materia no es un medio continuo. Hoy, todas nuestras interpretaciones sobre el comportamiento material se basan en la existencia de los átomos.

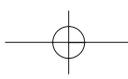
Admitir que existe la posibilidad de que un conocimiento aún no refutado pueda ser superado por nuevas investigaciones es fundamental para el avance de la ciencia. También lo es no rechazar ideas, por mucho que parezcan ofender la sensibilidad humana, hasta que la experimentación las ratifique o las refute.

La resistencia a reconocer nuevas ideas nos lleva en ocasiones a no aceptar que lo ya entendido antes no es vigente ahora. La renuencia a admitir el nuevo conocimiento fue enorme cuando se descubrieron los elementos químicos, cuando se plantearon las leyes de Newton de la mecánica o cuando Einstein introdujo el concepto de la relatividad.

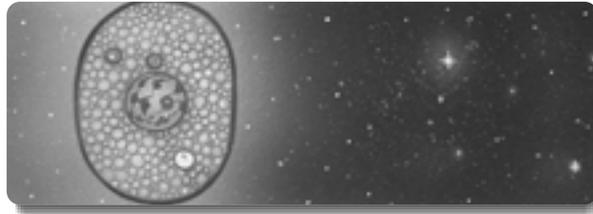
Los mismos científicos dudan en un principio de las propuestas de los otros. Cuando sobreviene una propuesta revolucionaria en ciencia, según lo ha interpretado Thomas Kuhn, se entra en un período de crisis, en el que el viejo paradigma (los compromisos compartidos por los científicos hasta entonces) se tambalea al aparecer un nuevo paradigma (una nueva forma de interpretar esa rama del conocimiento).

Einstein, por ejemplo, se resistió a aceptar algunas ideas de Bohr, de la misma forma que otros de sus contemporáneos se resistieron a aceptar las suyas. Aunque las leyes de Newton se reconocen como válidas para describir los aspectos mecánicos del mundo macroscópico, para el microscópico son las de Einstein, Bohr y otros las que prevalecen. Aceptarlo fue difícil, pero así es en la actualidad. Este último ejemplo nos conduce a pensar que el microcosmos no se puede explicar con las mismas reglas que el macrocosmos, pero de ahí a asegurar que no aparecerá una teoría unificadora que los englobe hay una gran distancia.





## 6 PRIMERA PARTE Manifestaciones de la materia



**Figura 0.9**  
Micro y macrocosmos.

La escala de tiempo y espacio de lo que los seres humanos podemos “ver” es sumamente restringida, por lo que hemos inventado equipos que nos permiten fotografiar vagamente a los átomos o bien observar las estrellas y, aún así, no podemos todavía generalizar el conocimiento científico en las dos escalas. De alguna manera es el precio que el ser humano paga por ser tan grande en el mundo atómico y tan pequeño en el mundo Universal. Los científicos suman esfuerzos para tratar de unir lo que alguna vez separaron, para darle a todo una explicación integral. Esta síntesis, sobra decirlo, es uno de los aspectos más difíciles de la investigación científica.

El conocimiento científico tiene siempre un grado de incertidumbre: el proceso de inducción, que permite generalizar a partir de muchas observaciones, no tiene un fundamento lógico estricto. Por ejemplo, por más que hayamos observado 1000 cuervos negros no existe la seguridad de que en algún lugar y algún día no aparezca un cuervo albino.



**Figura 0.10**  
El cuervo albino y la falla del proceso inductivo.

En efecto, la inducción falla en ocasiones. Por ejemplo, durante decenas de años se creyó que los gases nobles no reaccionaban químicamente, porque se erró muchas veces en el intento de hacerlos reaccionar. No obstante, para sorpresa de todos, en 1962 se obtuvieron los primeros ejemplos de los compuestos del xenón.

Entonces, ¿para qué aprender la Ley de la Conservación de la Materia, las diferencias entre una mezcla y una sustancia pura, las leyes de los gases o la supuesta estructura de los átomos, si dentro de 100 años podría cambiar nuestra concepción al respecto?

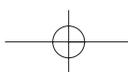
A pesar de que en el futuro suceda algún experimento en el que no se conserve la materia o un gas muy peculiar no se expanda al calentarlo, ello no alteraría prácticamente la estructura de la ciencia actual. En todo caso, habría que acomodar ese caso excepcional en el edificio de la ciencia para darle explicación a esa singularidad, y nada más. Las leyes fundamentales ya descubiertas conservarán su veracidad, porque se han repetido innumerables veces. No sólo eso, también existen aplicaciones evidentes de esos conocimientos, que han permitido aumentar el bienestar de la humanidad.

El estudio del comportamiento de los gases y los líquidos, por ejemplo, ayudó al invento de la olla exprés o al advenimiento de la era de los cohetes espaciales. Aun si dentro de 100 años las leyes de los gases sufren de una generalización debido a algún experimento particular que nos llevara a conclusiones distintas, ello no haría que la olla exprés dejara de cocinar los alimentos en menos tiempo. Quizás la explicación de por qué funciona sería ligeramente distinta, pero el hecho sería el mismo, la aplicación no se vería modificada.



**Figura 0.11**  
La olla exprés. Aunque las teorías se transformen, las aplicaciones del conocimiento permanecen.

En resumen, el conocimiento científico no nos conduce a verdades absolutas, pero indudablemente contribuye a aumentar el bienestar de la humanidad, a incrementar nuestro conocimiento del mundo y a saber cómo protegerlo. En la ciencia, la última palabra no está dicha y lo más probable es que nunca lo esté, pero el saber, el conocimiento acumulado, es estrictamente necesario para continuar con la búsqueda.



## QUÍMICA

Para la química, por ser una ciencia, se cumple todo lo dicho hasta ahora. Podemos definir esta ciencia, adoptando la definición del canadiense Nyholm:

*La química es el estudio integrado de la preparación, propiedades, estructura y reacciones de los elementos y sus compuestos, así como de los sistemas que forman.*

Aquí es evidente que se da por entendida una multitud de conceptos: “preparación”, “propiedades”, “estructura”, “reacciones”, “elementos”, “compuestos” y “sistemas”, a los que tendremos que volver en varios momentos, con el avance de este texto.

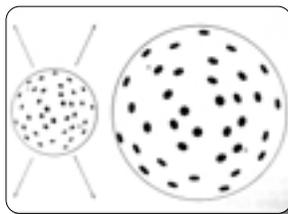
A lo largo de esta obra, según te nutras del lenguaje de la química, podrás estudiar los ensayos de este libro, los cuales te mostrarán el papel protagónico que esta ciencia juega para mejorar la calidad de vida de la humanidad. De seguro en el futuro, la química nos ayudará todavía más a resolver los problemas actuales y a ahondar en el conocimiento de lo aún oculto. Pero también aprenderás que se han presentado muchos problemas con el manejo de las sustancias químicas peligrosas.

### Química, ¿benefactora...

Como un adelanto de dichos ensayos, los siguientes apartados resumen los aportes más importantes de esta ciencia en el siglo XX. Hablan, sin duda, del papel central de la química para el bienestar del género humano:

- **Alimentación:** Los vegetales requieren de nitrógeno asimilable para crecer. A principios del siglo XX se logró en Alemania la síntesis del amoníaco. Éste quizás es el proceso químico que más beneficio ha aportado al género humano, ya que la comida de la población depende actualmente de él. Hoy se producen unos 70 millones de toneladas de fertilizantes nitrogenados a partir del proceso descubierto por Fritz Haber y Carl Bosch.

Con la química se producen los fertilizantes que han multiplicado el rendimiento agrícola por hectárea. Al producirse más alimentos se ha contribuido a un explosivo crecimiento demográfico (de 1.7 a casi 6 000 millones de habitantes en un siglo).



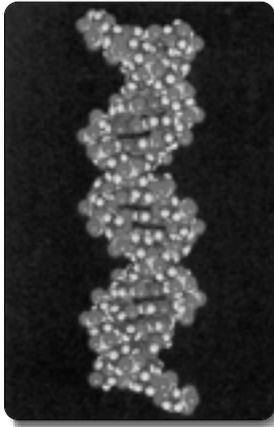
**Figura 0.12**

El universo, la gran explosión. Las galaxias se alejan unas de otras como si se tratara del proceso de inflar un globo.

- **Origen de la vida y del universo:** En el siglo XIX, se desarrolló la espectroscopía atómica (el estudio de la emisión de luz por átomos excitados). Pronto se reconoció la presencia de hidrógeno y helio en el Sol y, más tarde, de otros elementos. Con el telescopio se obtuvo el resultado de que esos mismos elementos aparecían en todo el Universo, y en proporciones similares. Gracias al análisis de la luz de las estrellas, en el siglo XX se encontró que las galaxias se alejan unas de las otras, dando lugar a la hipótesis de un Universo en expansión. Ello condujo a la teoría de que toda la materia estaba concentrada inicialmente y que el Universo se originó con una Gran Explosión (ver figura 0.12).
- En 1920, el ruso Alexander Oparin sugirió que los primeros aminoácidos se formaron a partir de los componentes de la atmósfera primitiva. Más tarde, los químicos estadounidenses Harold Urey y Stanley Miller demostraron experimentalmente que así es factible obtener una buena cantidad de ellos.

## 8 PRIMERA PARTE Manifestaciones de la materia

Más recientemente, se han develado los mecanismos de la formación primitiva de los componentes del ácido desoxirribonucleico (ADN), de polímeros de aminoácidos que exhiben formas primitivas de metabolismo, y se han lanzado propuestas para la síntesis de las primeras moléculas con capacidad de autorreplicarse.



**Figura 0.13**  
La doble hélice de ADN.  
Ambas hélices están unidas  
por bases nitrogenadas.

¡El análisis químico estelar dio luces sobre la teoría actual de la formación del Universo!  
¡Estamos lejos todavía, pero la química empieza a mostrar cómo se formó la vida en la Tierra!

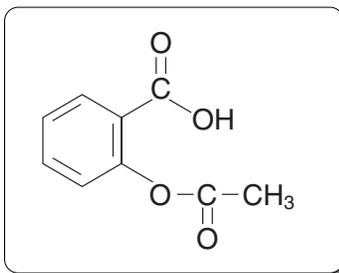
- **Biología molecular y el genoma humano:** En 1962 el Premio Nobel de Química fue otorgado a James Watson y Francis Crick por descifrar en 1953 la estructura tridimensional del ácido desoxirribonucleico (ADN). La figura 0.13 presenta la ya famosa estructura de la doble hélice.

Con este descubrimiento se abrieron las posibilidades para el estudio de la genética y de las bases moleculares de la vida. El ser humano tiene 3 000 millones de bases nitrogenadas, mientras que una mosca drosófila sólo tiene 165 millones, el hongo de la levadura cuenta con 14 y una bacteria como la que provoca la influenza posee únicamente 1.8 millones.

El Proyecto del Genoma Humano nace en 1990 con el objetivo de identificar el conjunto completo de instrucciones genéticas (60 a 80 mil genes) y, más tarde, el “texto” completo escrito en el ácido desoxirribonucleico (ADN) por medio de las bases nitrogenadas. Hacia el año 2001 se concretó el conocimiento de la secuencia del 100% del genoma.

Se presume que alrededor de 3 000 enfermedades tienen origen genético. Este proyecto dará luz sobre la esquizofrenia, el alcoholismo, el cáncer de mama, la enfermedad de Alzheimer o la depresión maníaca, entre otros males. Son varias las enfermedades en las que la diagnosis ha avanzado gracias al conocimiento de la alteración genética que las produce: la distrofia muscular de Duchenne, el retinoblastoma, la fibrosis cística, la neurofibromatosis y la obesidad, entre otras.

¡La química nos permite conocer las bases moleculares de la herencia y de la evolución de las especies!  
¡El análisis químico del genoma humano nos llevará a entender muchas enfermedades y cómo atacarlas!



**Figura 0.14**  
Fórmula del ácido acetilsalicílico  
(aspirina).

- **Medicamentos y salud:** La aspirina (figura 0.14) es el medicamento que más se ha consumido en la historia de la humanidad. Félix Hoffmann lo obtuvo en 1898.

Otros medicamentos fundamentales para la erradicación de enfermedades son los antibióticos. Primero aparecen las llamadas “sulfas” o sulfonamidas, y luego la penicilina. Las nuevas generaciones de antibióticos han tenido un papel principal en el alargamiento de la vida humana en este siglo y la disminución de la mortalidad infantil. El problema es que un abuso en el uso de los antibióticos o su empleo sin receta médica ha vuelto resistentes a muchos microorganismos.

Gracias al conocimiento de la mecánica de los fluidos, el transporte a través de membranas y la fisicoquímica de las superficies, el primer órgano artificial fue desarrollado en la década de 1960: el riñón artificial. Pocos años después la

hemodiálisis era una realidad que salvaba vidas de pacientes con falla renal aguda.

La bioingeniería y la ingeniería genética actuales obtienen moléculas humanas importantes para el tratamiento de enfermedades a partir de cultivos de bacterias inoculadas con genes humanos. Así se fabrican hoy la insulina para la diabetes, el interferón (para regular la respuesta celular a las infecciones virales y a la proliferación del cáncer), antígenos, hormonas de crecimiento, anticuerpos monoclonales, factores antihemofílicos y tantos otros.

La industria farmacéutica desarrolla la síntesis de los medicamentos que previenen o atacan las enfermedades humanas.  
¡La biotecnología y la biomedicina, con toda la química que hay detrás, avanzan para extender el período de la vida humana!

- **Materiales:** La química ha desarrollado materiales sintéticos cuyas propiedades superan a las de los productos naturales. Aparecen primero una multitud de polímeros sintéticos con los que se fabrica ropa y materiales de consumo. Más tarde surgen prótesis, así como órganos y tejidos artificiales. Luego cerámicas y materiales compuestos (fibras embebidas en una matriz polimérica) han revolucionado las industrias de la construcción y del transporte por su inigualable resistencia.

La revolución informática actual, fruto del “chip” y la microcomputadora fue posible gracias a la refinación del silicio. Igualmente, para la transmisión eficaz de las telecomunicaciones hoy se emplean vidrios de alta pureza (las fibras ópticas, ver figura 0.15A).



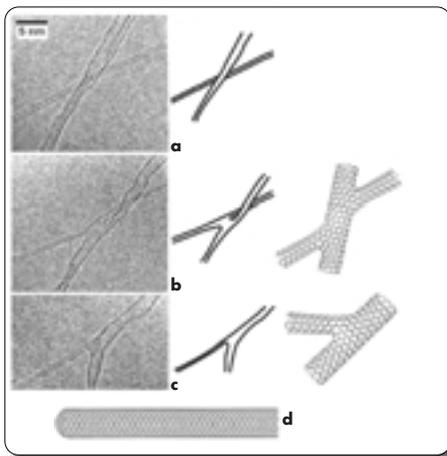
A)

A últimas fechas ha nacido la nanotecnología. No existe una definición precisa de lo que significa esto, pero los científicos han aprendido cómo controlar el tamaño y forma de una amplia gama de materiales, a nivel atómico y molecular.

En ese proceso han descubierto propiedades interesantes y potencialmente útiles, muchas de ellas no anticipadas por nadie.

Los últimos 15 años han sido testigos de la explosión de herramientas relativamente baratas para interrogar y manipular materiales a escala de los nanómetros, tales como microscopios de exploración y sondeo.

Al mismo tiempo, varios campos antes no relacionados (tales como la ingeniería eléctrica y la biología) han empezado a enfocarse a entender y controlar fenómenos físicos y químicos sobre esta escala de longitudes, típicamente de 1 a 100 nm. Dentro de esta nueva rama de la ciencia de los materiales existe un nuevo grupo de mexicanos, en San Luis Potosí, dedicados a trabajar sobre nanotubos de carbono, que son estructuras formadas únicamente por átomos de carbono (ver figura 0.15B).



B)

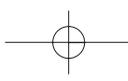
La química nos provee de los materiales que han revolucionado la industria, la informática y el consumo.

**Figura 0.15**

**A)** Fibras ópticas. **B)** de **a)** a **c)** Nanotubos de carbono fotografiados por los hermanos Mauricio y Humberto Terrones en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. **d)** Nanotubo de carbono de pared sencilla. Tomado de la “Image Gallery” del grupo de Richard E. Smalley. Ver [www.mb.tn.tudelft.nl/projects/carbon\\_nanotubes.html](http://www.mb.tn.tudelft.nl/projects/carbon_nanotubes.html)

- **Energía:** El petróleo aporta hoy 60% de la energía mundial. Los procesos químicos de refinación nos permiten mejorar día con día la calidad de los combustibles.

Respecto al carbón es importante idear procesos químicos que lo conviertan en combustibles gaseosos o líquidos, más manejables y menos contaminantes.



## 10 PRIMERA PARTE Manifestaciones de la materia

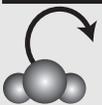
La química nos da pilas y acumuladores como fuentes de energía eléctrica. De la misma manera, la transformación económicamente viable de la energía solar en energía eléctrica o química se dará mediante el estudio de materiales con mayor eficiencia fotovoltaica.

La química es la base para la obtención de energía y la explotación racional de los recursos naturales.

- **Reducción del impacto ambiental:** En 1974, Mario Molina y Sherwood Rowland proponen que las moléculas de los llamados freones pueden afectar la capa de ozono estratosférica, que nos protege de la radiación ultravioleta del Sol. Reciben el Premio Nobel de Química en 1995, después de detectarse el hoyo de ozono en la Antártida y de comprobarse que dichos compuestos son los responsables del mismo. Un problema realmente global que amenaza la presencia de la humanidad en la Tierra será resuelto por el conocimiento químico de los mecanismos de reacción en la atmósfera terrestre.

¡Hoy más de 100 países han firmado protocolos para detener la producción de estos compuestos y la química ha desarrollado sustitutos menos dañinos para el ambiente!

No todos los casos han sido tan exitosos como los mencionados hasta ahora. También ha habido fracasos, accidentes y malos usos de la química. Conviene conocer estos malos ejemplos también, para que no se repitan más.

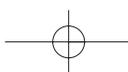


TE TOCA A TI:<sup>2</sup>

### Fertilizantes, lo bueno y lo malo

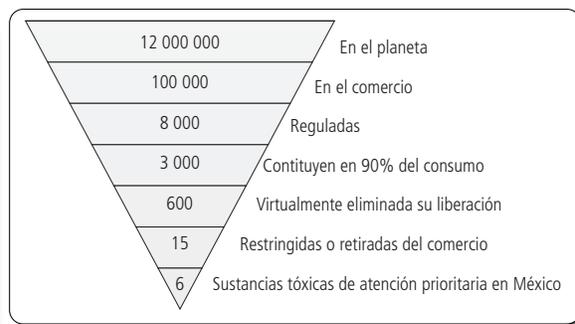
1. Consulta el artículo “Global Population and the Nitrogen Cycle”, escrito por Vaclav Smil, y publicado en el número de julio de 1997 en la revista *Scientific American* (si deseas leerlo en español, la traducción de esta revista se llama *Investigación y Ciencia*). Se trata de un artículo que pondera los beneficios y los riesgos de un proceso químico; su subtítulo dice “Alimentar ahora a la humanidad demanda tanto fertilizante nitrogenado, que la distribución del nitrógeno en la Tierra ha cambiado de una forma dramática y, en ocasiones, peligrosa”. En él se analiza el efecto positivo de la producción de fertilizantes químicos para combatir el hambre mundial, pero también se citan los problemas que la humanidad enfrenta por obtener hoy, industrialmente, una tercera parte del nitrógeno fijable disponible para las plantas.
2. Anota los riesgos que representa la proliferación de fertilizantes a base de nitrógeno en el medio ambiente. Son estos riesgos los que han llevado a varios grupos ecologistas a defender y promover la producción y el consumo de vegetales con abonos no sintéticos, mediante los llamados “cultivos orgánicos”.
3. Con un pequeño grupo de compañeros, intenta una entrevista con un representante de estos grupos y anota sus argumentos, o consulta otras fuentes impresas sobre el tema de la producción orgánica de vegetales. Indaga en particular sobre el precio al que se ofrecen en el mercado estos vegetales cultivados orgánicamente, en comparación con los obtenidos con fertilizantes inorgánicos sintéticos.
4. Desarrollen en el salón de clases una discusión sobre las ventajas y las desventajas de la producción de fertilizantes industriales, en la que se adelanten propuestas razonables para su desarrollo futuro.

<sup>2</sup> La sección “TE TOCA A TI” es una invitación a aplicar lo desarrollado en el texto en un ejemplo específico. Se trata de problemas provocativos que te permitirán apreciar si has entendido.



**Figura 0.16**

Universo de las sustancias químicas. Son 8 000 las que han sido clasificadas con diverso grado de peligrosidad. (Tomado de Cristina Cortinas *et al.*, *Programa de gestión ambiental de sustancias tóxicas de atención prioritaria*, México: Instituto Nacional de Ecología, 1995; consultar también la página de esta autora en <http://cristinacortinas.com>). La figura tiene validez en enero de 2005, ya que la autora nos dice "La figura sigue en lo general siendo válida, quizás haya unos cuantos miles de sustancias comerciales más. El dato sobre las 8 000 sustancias reguladas no ha cambiado. Los datos sobre las 3 000 sustancias de amplio consumo y las 600 prohibidas o restringidas tampoco. Las 15 sustancias eliminadas virtualmente corresponden a las que son objeto del Convenio de Rotterdam de las Naciones Unidas. En cuanto a las seis sustancias prioritarias en México en el periodo 1994-2000, correspondían a las que estaban sujetas a planes de acción nacional o comprendidas en programas de atención prioritaria: DDT, clordano, bifenilos policlorados, mercurio, plomo y cadmio.



### ...o villana?

Las sustancias químicas con propiedades de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad e inflamabilidad (propiedades CRETI) representan un peligro para la salud humana y para el ambiente. El manejo de dichas sustancias implica un riesgo, ya que existe cierta probabilidad de daño como consecuencia de la exposición al peligro. La figura 0.16 muestra que es una fracción relativamente pequeña la de las sustancias químicas peligrosas y aún menor la de las realmente letales. No obstante, es importante prevenir que no se haya las condiciones de exposición que impliquen un grado importante de vulnerabilidad para la población.

Veamos otro ejemplo que es una muestra clara de lo limitado o ilimitado del peligro producido por las sustancias químicas. El rectángulo negro de la figura 0.17 es nuestro grado de ignorancia respecto al efecto carcinogénico de todas las sustancias conocidas, porque únicamente hemos probado los efectos de 7000 (cuadrado blanco) y encontrado unas 30 sustancias claramente carcinogénicas (punto blanco a la derecha de la flecha).

Cuando no se establecen procedimientos rigurosos para el manejo de sustancias peligrosas, o cuando ocurren accidentes lamentables por la falta de mantenimiento o supervisión suficientes, o cuando definitivamente se piensa en la química como un arma para matar enemigos, nuestra ciencia acumula puntos negativos en la percepción de la sociedad. He aquí algunos ejemplos:

- **Accidentes industriales:** El isocianato de metilo se utiliza para sintetizar plaguicidas. En 1984, en Bophal, India, ocurrió una fuga industrial importante de este compuesto líquido. Su toxicidad es tan grande, que murieron alrededor de 2500 personas, entre obreros y habitantes de la ciudad.

Otro accidente similar había ocurrido años antes, en 1976, en la ciudad italiana de Seveso. La sustancia tóxica en este caso fue la dioxina (ver figura 0.18), con efectos teratogénicos, es decir, que causa anormalidades en el feto.

En la Ciudad de México, se presentaron, en 1984, seis explosiones en la planta de tratamiento de gas licuado de San Juanico. El informe oficial habla de 324 muertos, 200 casas totalmente destruidas y otras 500 con daños diversos.

¡Se requieren planes de seguridad integral que minimicen la probabilidad de accidentes industriales!

**Figura 0.17**

Comparación de las 30 sustancias con probados efectos carcinogénicos (punto blanco a la derecha de la flecha) contra las sustancias que han sido probadas para estos mismos efectos (cuadrado blanco de la izquierda), que son 7000. El rectángulo negro representa los 12 millones de sustancias que existen sobre la superficie de la Tierra.

## 12 PRIMERA PARTE

## Manifestaciones de la materia

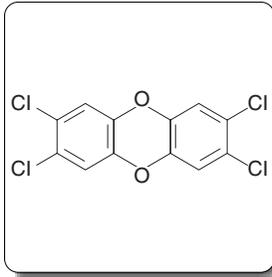


Figura 0.18

Dioxina: 2,3,7,8 tetracloro-dibencen-p-dioxina.



Figura 0.19

Paisajes como éste nos alertan del daño ecológico de los detergentes no biodegradables.

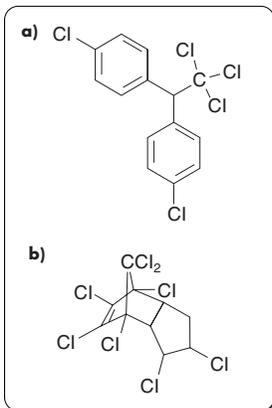


Figura 0.20

a) DDT. b) Clordano.

- **Exposición a sustancias peligrosas:** Hoy existe una conciencia creciente acerca de los efectos potenciales sobre la salud de los compuestos que se arrojan al ambiente, sea por su producción, almacenamiento, venta, uso, transportación y/o eliminación.

Quizás el caso más sonado fue el de las ciudades japonesas de Minamata (1956) y Niigata (1965), en donde la industria arrojaba mercurio al agua de la bahía, que se acumuló en la cadena alimentaria. Primero se detectó la muerte masiva de los gatos, pero más tarde miles de personas enfermaron por la ingestión de pescado. El mercurio provoca desórdenes mentales, perturbaciones motoras, afecciones renales, daños pulmonares y, finalmente, la muerte.

¡Los desperdicios industriales deben caracterizarse y disponerse de manera que no afecten la salud o el ambiente!

- **Contaminación del aire:** En las grandes ciudades, el uso de combustibles empobrece la calidad del aire. Estos procesos liberan gases que propician la formación de ozono (que irrita el sistema respiratorio), monóxido de carbono (gas tóxico que toma el lugar del oxígeno en la hemoglobina de la sangre) y dióxido de azufre (sustancia tóxica que produce ácido sulfúrico, que luego se precipita en forma de lluvia ácida).

El caso más grave, con miles de muertos, se dio en Londres en 1952 cuando, por el frío invernal, miles de hogares quemaron carbón con alto contenido de azufre durante varios días en los que persistió una inversión térmica sobre la atmósfera de la ciudad.

Los procesos de combustión son fuente de energía, ¡pero también de contaminación!

- **Productos no biodegradables:** Un problema grave de los desperdicios plásticos o de los detergentes es que muchos de ellos permanecen inalterados en el ambiente durante muchos años, ya que no pueden ser destruidos biológicamente por los microorganismos. Es lamentable la contaminación de los ríos y los mares con estas sustancias, pues amenaza con interrumpir la cadena alimentaria, con peligrosos efectos (ver figura 0.19).

Hay que producir benefactores equivalentes que sí puedan ser degradados por bacterias y microbios, ¡aunque resulte un poco más caro!

- **Plaguicidas:** Los cultivos son atacados por insectos, babosas, caracoles, gusanos, hongos y bacterias, entre otras plagas. Las pérdidas de alimentos llegan a alcanzar 40% de las cosechas, por lo que es prioritario evitarlas. La química ha generado productos para ello, algunos de los cuales han resultado “remedios peores que la enfermedad”, por sus largos tiempos de permanencia en el ambiente y su efecto nocivo sobre la cadena alimentaria, como fue el caso del DDT. Los compuestos organo-clorados, como el DDT y el clordano (ver figura 0.20), provocan efectos degenerativos en el hígado. Su producción ha sido detenida en la mayoría de los países.

¡Todo producto que se introduce al ambiente debe pasar por pruebas irrefutables de toxicidad en vegetales y en animales superiores!

- **Armas químicas:** Los casos anteriores se deben de alguna u otra manera a la negligencia, pero la fabricación de armamento químico para aniquilar vidas humanas es absolutamente perversa, como perverso es todo tipo de guerra. El fosgeno o el gas mostaza —utilizados de forma directa en la Primera Guerra Mundial—, el agente naranja —sustancia defoliadora que destruyó la tierra cultivable en la Guerra de Vietnam—, y tantos otros, son ejemplos lamentables del mal uso de la ciencia hecho por cerebros execrables.

La ciencia es conocimiento. Puede usarse para salvar vidas o ¡para matar!



EN EQUIPO:<sup>3</sup>

### Química, ¿benefactora o villana?

Acabamos de decir que con la química se obtienen beneficios y riesgos, ventajas y desventajas, se salvan vidas o se aniquilan. Imagina que un medio de comunicación organiza una discusión para determinar si “la química debe o no permanecer como actividad humana”. Organicemos en el grupo un debate como simulacro.

Organízate en equipos de cuatro personas. Determinen en conjunto quién quiere participar del lado de la “química como benefactora” y quiénes lo harán del lado de la “química como villana” (dos por cada posi-

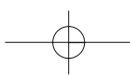
ción). Antes del debate, averigüen la mayor cantidad de información posible para tener los argumentos que les permitan defender su punto de vista, es decir, qué pasaría a favor y en contra, en un mundo en el que la química no fuera una actividad humana permitida. Con posterioridad, sugieran al profesor la organización de un debate en el que participen todos los alumnos del grupo y del que saquen todos ustedes sus propias conclusiones, entre otras, cómo maximizar los beneficios y minimizar los riesgos.

### PROBLEMAS Y ACTIVIDADES<sup>4</sup>

1. Propón una respuesta a las siguientes preguntas, planteadas en la sección CON ESCEPTICISMO:
  - a) ¿Ciertamente existen cosas mucho más pequeñas que nosotros, que no alcanzamos a percibir con los sentidos?
  - b) ¿Qué elementos tienes para sostener la afirmación anterior?
  - c) ¿Podemos confiar en los aparatos? ¿Por qué?
  - d) ¿Podemos confiar en las leyes? ¿Por qué?
  - e) ¿Por qué hay unas leyes para describir el mundo macroscópico y otras para explicar el microscópico?
  - f) ¿Qué tanto las interpretaciones de lo observado dependen de la persona que mira y de lo que cree saber previamente?
  - g) ¿Cómo intentan los científicos evitar ese sesgo?
2. Ciencia y tecnología son, aparentemente, dos conceptos diferentes. A partir de una búsqueda bibliográfica, desarrolla un trabajo de unas pocas cuartillas sobre los conceptos de ciencia y tecnología, sus nexos y sus diferencias.
3. Parece que no podemos fiarnos mucho del sentido común. ¿Cuáles serían tus argumentos para convencer a una persona iletrada de que la Tierra es redonda y de que gira alrededor del Sol?

<sup>3</sup> La sección “EN EQUIPO” es una invitación al trabajo colectivo. En la sociedad moderna, los proyectos se abordan en grupos de profesionales, en los que cada uno aporta lo que sabe. El resultado, al contener diversas visiones sobre el problema, es superior al del trabajo individual.

<sup>4</sup> Al final de cada capítulo del libro se te propone una serie de PROBLEMAS Y ACTIVIDADES para reforzar el aprendizaje.



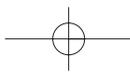
## 14 PRIMERA PARTE Manifestaciones de la materia

Si no crees ser suficientemente convincente, trabaja en equipo y consulta la bibliografía para alcanzar una argumentación más sólida.

4. Con relación al asunto anterior, hay temas todavía más difíciles de explicar y de entender. ¿Qué elementos de análisis y persuasión utilizarías para convencer a un escéptico de que la materia está compuesta de pequeñas partículas, como átomos y moléculas? ¿Te sientes realmente convincente con dichos argumentos?
5. Consulta en varios libros la definición que aportan de química. Realiza una síntesis de todas ellas y formula una definición personal con la que te sientas a gusto. Contrasta con algunos compañeros tu propuesta y haz ante ellos una defensa de la misma, en la que recibas también sus argumentos. Escribe, como resultado del debate, una definición que te parezca más completa.
6. Haz una pequeña reseña acerca de las que consideras —mediante un investigación previa— como aportaciones importantes de la química en el terreno deportivo. Recoge de tus compañeros y tu profesor su propia visión al respecto y verás que hay contribuciones de las que no sospechabas.
7. En ciertas dosis, algunas sustancias químicas son sumamente benéficas, como la aspirina. Sin embargo, su empleo indiscriminado y a mayores dosis puede ser fatal. Investiga los efectos sobre la salud de diferentes dosis de aspirina y de otros medicamentos de uso común. Investiga sobre el llamado “síndrome de Reye”.
8. El manejo de las sustancias químicas implica un riesgo. El benceno es un disolvente orgánico muy utilizado en la industria y el laboratorio. Consulta los riesgos de su empleo debidos a su toxicidad y las medidas que deben tomarse para su manejo adecuado.

### BIBLIOGRAFÍA

- Amundson, N.R. (coord.), *Frontiers in Chemical Engineering. Research Needs and Opportunities*, National Academy Press, Washington, 1988.
- Ball, P., *Designing the Molecular World*, Princeton University Press, 1994.
- Boorstin, D.J., “The New Age of Discovery. A celebration of Mankind’s Exploration of the Unknown”, *TIME* número especial, diciembre de 1997/Enero de 1998.
- Bronowski, J. *El ascenso del hombre*, Fondo Educativo Interamericano, S.A., Estados Unidos de Norteamérica, 1979.
- Chalmers, A.F., *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?*, Siglo XXI Editores, México, 1996.
- GENENTECH, “Introduction”, *The Human Genome Project*, [http://www.gene.com/ae/AB/IE/Intro\\_The\\_Human\\_Genome.html](http://www.gene.com/ae/AB/IE/Intro_The_Human_Genome.html)
- Hamburger, J., *La filosofía de las ciencias hoy*, Siglo XXI Editores, México, 1989.
- Hill, J.W., *Chemistry for Changing Times*, Macmillan, Nueva York, 6a edición, 1992.
- Instituto Nacional de Ecología, *Gestión ambientalmente racional de las sustancias químicas desde la perspectiva de la industria*, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México, 1997.
- Instituto Nacional de Ecología, *Programa de gestión ambiental de sustancias tóxicas de atención prioritaria*, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México, 1997.
- Joesten, M.D., Johnston, D.O., Netterville, J.T. y Wood, J.L., *The World of Chemistry*, Saunders, Filadelfia, 1991.
- Kauffman, G.B. y Szmant, H.H. (eds.), *The Central Science. Essays on the Uses of Chemistry*, Texas Christian University Press, Forth Worth, 1984.
- Leshan, L. y Margenau, H., *El espacio de Einstein y el cielo de Van Gogh*, Gedisa, Barcelona, 1985.
- March, R.H., *Física para poetas*. Siglo XXI Editores, México, 1982.
- McGlashan, M.L., *Physicochemical Quantities and Units*, Royal Institute of Chemistry, Londres, 1971.
- Nassau, K., “The causes of color”, *Sci. Am.* 243[4], 106-123, 1980.
- Pauling, L., *Química General*, Aguilar, Madrid, 1977.
- Pérez Tamayo, R., *Cómo acercarse a la ciencia*, Limusa Noriega, México, 1989.
- Sanjurjo, M., “La aspirina, legado de la medicina tradicional”, *Educ. Quím.* 7(1), 13-15, 1996.
- Sanjurjo, M., “La penicilina, pionera de la era de los antibióticos”, *Educ. Quím.* 8(2), 68-74, 1997.



**ÍNDICE DE MATERIAS DE LA INTRODUCCIÓN**

- A**
- Accidentes industriales, 11
    - Acetilsalicílico
  - Ácido, 8
  - ADN, 8
  - Agente naranja, 13
  - Amoniaco
    - Síntesis del, 7
  - Antibióticos, 8
  - Aristarco, 5
  - Armas químicas, 13
  - Aspirina, 8
  - Astrología, 3
  - Átomo
    - de Dalton, 5
- B**
- Biodegradabilidad, 12
  - Bioingeniería, 9
  - Biología Molecular, 8
  - Bophal
    - Accidente de, 11
  - Bosch, Carl, 7
- C**
- Carbón, 9
  - Ciencia
    - definición de, 2
    - métodos de la, 4
  - Clordano, 12
  - Conocimiento científico, 4
  - Copérnico, Nicolás, 5
  - CRETI
    - Propiedades, 11
  - Crick, Francis, 8
  - Cultura, 3
- D**
- DDT, 12
  - Desoxirribonucleico
    - ácido, 8
  - Dióxido de azufre, 12
  - Dioxina, 11
- E**
- Energía eléctrica, 10
  - Espectroscopía atómica, 7
- F**
- Fertilizantes, 7
  - Fibras ópticas, 19
  - Fosgeno, 13
  - Freones, 10
- G**
- Gas mostaza, 13
  - Genoma humano, 8
  - Gran explosión
    - la, 7
- H**
- Heber, Fritz, 7
  - Hipótesis, 4
- I**
- Ingeniería genética, 9
  - Insulina, 9
  - Interferón, 9
  - Inversión térmica, 12
  - Isocianato de metilo, 11
- K**
- Kepler, Johannes, 5
- L**
- Lluvia ácida, 12
- M**
- Macrocosmos, 2
  - Materiales compuestos, 9
  - Mercurio
    - Toxicidad, 11
  - Microcosmos, 2
  - Miller, Stanley, 7
  - Minamata
    - Bahía de, 11
  - Modelo, 4
  - Molina, Mario, 10
- O**
- Observación, 4
  - Oparin, Alexander, 7
  - Origen de la vida, 7
  - Ozono
    - hoyo de, 10
- P**
- Ozono troposférico, 12
  - Penicilina, 8
  - Petróleo
    - energía mundial, 9
  - Plaguicidas, 12
  - Polímeros, 9
  - Productos no biodegradables, 12
  - Ptolomeo, 5
- R**
- Riñón artificial, 8
  - Rowland, Sherwood, 10
- S**
- San Juanico
    - accidente de, 11
  - Seveso
    - accidente de, 11
  - Silicio e informática, 9
  - Sistema, 4
  - Sol
    - composición del, 7
  - Sulfonamidas, 8
  - Sustancias peligrosas, 11
- T**
- Teoría, 4
- U**
- Universo
    - origen del, 7
  - Urey, Harold, 7
- W**
- Watson, James, 8

# La materia en la naturaleza

## TEMARIO

CON ESCEPTICISMO: ¿Cambios físicos y químicos?	15
CONCEPTOS FUNDAMENTALES: LA MATERIA	17
Sustancias puras y mezclas	18
TE TOCA A TI: Sustancias puras y mezclas	19
PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS	19
Propiedades físicas intensivas	19
HERRAMIENTA: Sistema Internacional de Unidades	20
Solubilidad	20
Densidad	20
Punto de fusión (ebullición)	20
Capacidad calorífica específica	21
Viscosidad	21
TE TOCA A TI: Denso y viscoso	21
Propiedades químicas intensivas	21
TE TOCA A TI: Busca otras propiedades	22
MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE MEZCLAS	22
Filtración	22
Destilación	22
DESCÚBRELO TÚ: contenido alcohólico en algunas bebidas	23
Cristalización	23
DESCÚBRELO TÚ: Cristalización fraccionada	24
Extracción	24
DESCÚBRELO TÚ: Cafeína en una bebida de cola	21
Cromatografía	21
DESCÚBRELO TÚ: Colorantes en la gelatina	26
TE TOCA A TI: Otros procesos de separación	26
DEL PASADO: Metales, elementos; gemas, mezclas	27
CTS Industrial: Destilación del petróleo	28
El proceso de formación del petróleo	28
Importancia económica del petróleo	29
Destilación del gas natural	29
PROBLEMAS Y ACTIVIDADES	30
BIBLIOGRAFÍA	33



## CON ESCEPTICISMO:

### ¿Cambios físicos y químicos?

Es bastante generalizada la tendencia a clasificar los fenómenos naturales en dos grandes bloques: uno que agrupa a los de carácter físico y en otro a los de naturaleza química. El libro clásico de Samuel Glasstone (1946) toca el tema con suma prudencia, al decir (ver el subrayado):

“Con el propósito de su estudio, se ha encontrado conveniente dividir los fenómenos naturales en dos clases:

Una consiste de cambios de naturaleza aparentemente permanente, que involucran la transformación de una forma de materia en otra (QUÍMICA);

Otros son cambios temporales, generalmente resultantes de la alteración de las condiciones externas (FÍSICA)”.

Así, para Glasstone, el motivo de la clasificación era sólo de conveniencia para el estudio de los fenómenos. Dicha moderación se ha disipado posteriormente, cuando centenas de libros definen de manera formal e insisten en diferenciar tajantemente los fenómenos físicos de los químicos, a través de aseveraciones como las siguientes:

- Un **cambio físico** es aquel en que no cambia la identidad química de la materia aunque, en todo caso, cambie su forma. La transformación física no es permanente, ya que mediante un cambio en las condiciones externas puede volverse al estado inicial del sistema con un gasto menor de energía. Doblar una hoja de papel es un cambio físico. Otro ejemplo es un cambio de fase o de estado de agregación (cuando una sustancia pasa del estado líquido al sólido o al gaseoso, entre otros). En todo cambio físico la sustancia conserva su identidad química. Papel o papel doblado, son celulosa. Hielo y vapor de agua tienen



**Figura 1.1**

Colisión de dos bolas de billar. Un fenómeno físico.



**Ilustración 1.2**

Formación de herrumbre, un cambio químico.



**Figura 1.3**

Agua líquida y hielo. ¿Se trata de la misma forma de materia?

algunas propiedades diferentes, pero ambos son muestras de agua que pueden reaccionar químicamente como tal.

- Un **cambio químico** es aquel en donde una clase de materia se transforma en otra, a través de una reacción química. Por ejemplo, el hierro, Fe, reacciona con el oxígeno, O<sub>2</sub>, para formar herrumbre u óxido de hierro (III), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Podemos asegurar que se trata de un cambio químico porque las propiedades de los reactivos (hierro: metal; oxígeno: gas incoloro) son notablemente diferentes a las del producto (óxido de hierro: sólido marrón quebradizo). Para que la herrumbre pueda convertirse otra vez en hierro y oxígeno gaseoso se necesita efectuar nuevamente un cambio químico. Los materiales originales, hierro y oxígeno, no pueden separarse de la herrumbre mediante ningún cambio físico.

En otro libro de la época, Linus Pauling (1947) define como propiedades químicas de las sustancias a “aquellas que se refieren a su comportamiento en las reacciones químicas” y a éstas como “los procesos por los cuales unas sustancias se transforman en otras”. Así, todo estaría posiblemente claro si pudiéramos caracterizar en forma nítida lo que significa “la transformación de una forma de materia en otra”. ¿Cómo podemos asegurar mediante la observación que ha ocurrido un cambio químico? ¿Qué significa eso de que “una forma de materia se transforme en otra”? Los siguientes ejemplos pueden ayudarnos a establecer más firmemente el debate, al fomentar en ti el escepticismo sobre este tema:

1. ¿Qué argumentos puedes dar para sostener que, al congelarse, el agua líquida no se ha transformado en una nueva forma de materia? ¿Algo más que la reversibilidad del proceso al aumentar nuevamente la temperatura? ¿Es convincente que la congelación no es un fenómeno químico? ¿Cómo podrías demostrar con argumentos observacionales que el hielo y el agua líquida están formados por la misma clase de materia?
2. No cabe duda que las propiedades de hierro y oxígeno son absolutamente diferentes a las de la herrumbre. Parece tratarse éste de un cambio químico. ¿Pero no es cierto que las propiedades del agua líquida y del vapor de agua son también diferentes? Por ejemplo, una es un líquido y la otra un gas; la densidad de una es más de mil veces mayor que la de la otra, lo mismo que su viscosidad; el vapor de agua sí reacciona con el carbón para dar gas de agua (mezcla de CO y H<sub>2</sub>), cuestión que no es posible lograr con el agua líquida. ¿Son de verdad ambas muestras de la misma sustancia: agua?
3. El diamante se transforma lentamente en grafito, que es la forma alotrópica más estable del carbono. La transformación implica un rearrreglo importante de las posiciones de los átomos, así como la ruptura y creación de múltiples enlaces, a pesar de que la energía neta necesaria es relativamente pequeña. ¿Se trata de un fenómeno químico? No cabe duda de que diamante y grafito son sustancias diferentes, y no sólo en su precio. Pero, ¿acaso no son similares las propiedades químicas de los dos alótropos? ¿No son la misma sustancia al estar formados ambos por átomos de carbono solamente?
4. Al variar las condiciones externas, por ejemplo un cambio de temperatura o de presión, el vapor de agua se transforma en agua líquida. Se argumenta que esta reversibilidad permite caracterizar al fenómeno como físico. No obstante, existen reacciones químicas reversibles que transitan de los reactivos a los productos mediante cambios en las condiciones externas. Un ejemplo es la reacción de dimerización del NO<sub>2</sub> para dar N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.<sup>1</sup> ¿Existen argumentos basados en la observación para diferenciar a uno u otro fenómeno como físico o químico?

<sup>1</sup> El dióxido de nitrógeno puede obtenerse en una campana de gases al añadir ácido nítrico concentrado a una moneda de cobre. Si dicho gas se colecta en una jeringa, puede observarse la reacción de dimerización por un cambio de coloración al aplicar presión o cambiar la temperatura.



**Figura 1.4**

El oscurecimiento en una carátula de un reloj digital ¿es un fenómeno químico?

5. Cuando en la carátula de un reloj digital se ennegrecen algunos segmentos debido al paso de la corriente eléctrica, mostrándonos la hora, 12:07AM, ¿ocurre una reacción química? ¿Qué ha pasado en el cristal líquido de la carátula? ¿Se trata solamente de un fenómeno de acomodación física de las moléculas que hace cambiar su apariencia? ¿Se forman nuevas moléculas?
6. Normalmente, al calentar una sustancia líquida llega a ocurrir la vaporización de la misma, fenómeno que se caracteriza como un cambio físico. No obstante, al calentar un huevo crudo, directamente o en un baño María, éste se convierte en un sólido (huevo cocido). ¿Se trata éste de un fenómeno físico también o de un fenómeno químico? Si escogiste la última alternativa, ¿qué reacción química ha ocurrido en este caso?

Parece existir una diferencia “sutil” entre los cambios físicos y los químicos. Ciertamente, en ocasiones hay una barrera difusa entre ambos. La manera de diferenciarlos requiere identificar una nueva forma de materia, producto de una reacción química. Sin embargo, dicha cuestión sólo puede dilucidarse mediante el estudio minucioso de la estructura microscópica de la materia, lo cual no es accesible por los métodos ordinarios de observación. Así, hemos de resignarnos a perder la posibilidad de definir el concepto desde un punto de vista puramente observacional, para introducirnos en las entrañas del lejano microcosmos. Al adentrarnos en este libro en el estudio de la estructura atómica y molecular quizás desarrollemos más elementos de juicio para distinguir con más certeza los cambios físicos de los químicos.

Por lo pronto, estas definiciones han sido útiles para avanzar en el estudio de los fenómenos naturales. El propósito al incorporarlas en este texto es establecer modelos extremos sobre el comportamiento de la materia. Los científicos son muy afectos a sentar dicotomías u oposiciones entre dos conceptos (física-química, ácido-base, donadores-aceptores, covalencia-ionicidad), cuestión que hay que tomar siempre con cautela.



**Figura 1.5**

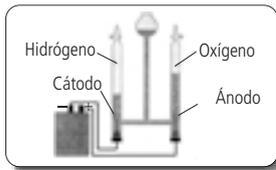
Collage de muestras de materia de un laboratorio químico.

No obstante, en ciencia resulta elemental no confundir los modelos con la realidad. Quizá podamos encontrar casos reales de transformaciones de la materia que se adapten cercanamente a la definición ya sea del modelo de cambio físico o del químico, pero nada más. El hecho de que no exista una frontera claramente definida entra ambos nos habla, afortunadamente, de la unidad del conocimiento científico.

## CONCEPTOS FUNDAMENTALES: LA MATERIA

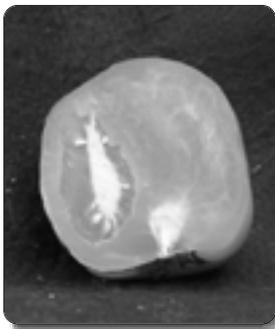
Los protagonistas en la química son los elementos, sus compuestos y los sistemas que forman; en una palabra, esta ciencia se encarga del estudio de la materia.<sup>2</sup> Es por esto que uno de sus conceptos básicos es el de **materia**. Todas las transformaciones químicas tienen lugar en muestras ordinarias de materia. La forma en la que está estructurada es la que determina sus propiedades físicas y químicas, la manera en la que puede reaccionar y, en ocasiones, las posibilidades de su utilización.

<sup>2</sup> Hay que aclarar que la química se ocupa de las propiedades de la llamada “materia ordinaria”, es decir, la que se encuentra a temperaturas, presiones y gravedad moderadas (ver la sección PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS, página 19). En las estrellas, por ejemplo, donde las temperaturas son de millones de grados y la fuerza de gravedad es inmensa, la materia no se presenta en su forma ordinaria (átomos, moléculas, etcétera). En esas condiciones su comportamiento no se da a través de transformaciones químicas.



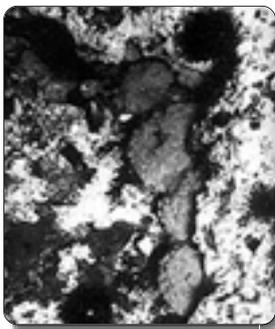
**Figura 1.6**

Cuando una muestra de agua se somete a electrólisis, se producen siempre ocho gramos de oxígeno por cada gramo de hidrógeno. La relación de volúmenes de ambos gases es siempre 2:1.



**Figura 1.7**

Dentro de un tomate pueden distinguirse a simple vista por lo menos tres fases, la de la pulpa, la de la piel y la de las semillas. Se trata de una mezcla heterogénea.



**Figura 1.8**

Fotografía al microscopio electrónico de una muestra de fundición de acero maleable. Pueden observarse los granos de hierro y las porciones de grafito. Lo que a simple vista parece una mezcla homogénea puede resultar finalmente una mezcla heterogénea.

## Sustancias puras y mezclas

La materia puede clasificarse por su constitución química en sustancias puras y mezclas. Entre las primeras podemos identificar a los elementos y a los compuestos, según puedan descomponerse o no en sustancias más simples mediante métodos químicos, tema sobre el que profundizaremos en el segundo capítulo.

Una **sustancia pura** es una muestra de materia que no puede ser separada en otras mediante cambios físicos.

La composición química de una sustancia pura está suficientemente definida, o es constante. Por ejemplo, cuando se descompone químicamente el agua siempre se obtienen ocho gramos de oxígeno por cada gramo de hidrógeno, no importa la procedencia ni el estado físico en que se encuentre el agua original. En el vidrio utilizado en las fibras ópticas, la composición también es constante, 44 gramos de silicio por cada 100 gramos de fibra.

Por su parte, una **mezcla** contiene dos o más sustancias. Cada sustancia de la mezcla mantiene su identidad química. Una de las características de las mezclas es que las sustancias que las forman se pueden separar mediante cambios físicos (ver la sección MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE MEZCLAS en la página 22). Contrario a lo que ocurre con las sustancias puras, la composición de las mezclas puede cambiar continuamente. Por ejemplo, alcohol y agua pueden mezclarse en cualquier proporción y pueden separarse gracias a una destilación (cambio físico).

En la tabla 1.1 se resumen las diferencias entre las mezclas y los compuestos puros.

Dentro de las mezclas las tenemos homogéneas y heterogéneas. En una **mezcla homogénea** las propiedades son las mismas en cualquier porción de la mezcla. Un ejemplo lo constituyen las **disoluciones**, como la que se forma cuando se disuelve azúcar en agua. En una **mezcla heterogénea**, los componentes individuales permanecen físicamente separados y, en ocasiones, se pueden ver como tales. Un ejemplo de ello es una ensalada, donde la lechuga, el tomate y el pepino se pueden identificar claramente.

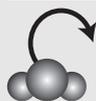
Otro ejemplo de una mezcla heterogénea, mucho más sutil, es el caso de cierto tipo de aceros, que solamente mediante el microscopio puede observarse que están formados por dos sustancias diferentes: granos de hierro y partículas rugosas de grafito.

Las propiedades de los compuestos son distintas cuando éstos se encuentran puros o cuando forman una mezcla, debido a la presencia de impurezas. Prueba de ello está en el color de las gemas, como veremos más adelante, o en muestras de vidrio, con las que se pueden formar fibras ópticas cuando están en estado puro, o lentes con diversas propiedades en función de la adición de impurezas especiales.

**Tabla 1.1**

Características de las mezclas y de los compuestos puros.

Mezclas	Compuestos puros
Pueden separarse en sus componentes mediante cambios físicos	No pueden separarse en sus componentes por cambios físicos
Su composición puede variarse de manera continua al agregar uno de sus componentes	Su composición es constante la mayor parte de las veces.
Sus propiedades están ciertamente relacionadas con las de sus componentes	Sus propiedades no están relacionadas con las de los elementos que los constituyen químicamente



TE TOCA A TI:

## Sustancias puras y mezclas

A partir de tus conocimientos previos, indica si los siguientes materiales corresponden a un elemento, un compuesto puro o una mezcla:

- |                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| a) Agua de mar      | f) Hierro               |
| b) Un pedazo de oro | g) Gasolina             |
| c) Vapor de agua    | h) Pintura de aceite    |
| d) Madera           | i) Mercurio             |
| e) Ácido acético    | j) Aire                 |
|                     | k) Aceite para cocinar  |
|                     | l) Bicarbonato de sodio |
|                     | m) Magnetita            |

## PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS

Las **propiedades** de una sustancia son sus cualidades características. Son las que permiten afirmar, con base en la observación, si estamos frente a una sustancia determinada u otra.

Un atributo básico de la materia es el de poseer **masa**. Ésta es una de sus propiedades más fundamentales. Sobre la superficie de la Tierra, la presencia de masa en un cuerpo se refleja en la atracción del planeta sobre él, de acuerdo con la ley de gravitación. Así de la masa deriva entonces el concepto de **peso**.

Las propiedades pueden clasificarse en **extensivas e intensivas**. Las primeras dependen de la dimensión de la muestra (su masa o su volumen, por ejemplo) y las segundas no cambian en función del tamaño de la muestra (la densidad, entre muchas otras), es decir, son características de las sustancias y no de muestras particulares de ellas, por lo que les dedicaremos más atención.

### Propiedades físicas intensivas

Las propiedades físicas más evidentes son las que se detectan con los sentidos. Por ejemplo, del aspecto visual de la sustancia surgen las siguientes:

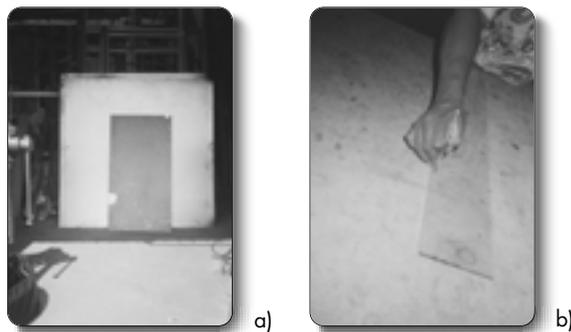
- Estado de agregación (si es sólida, la forma de los cristales, etcétera);
- Color.

El resto de los sentidos agrega otras propiedades:

- Olor;
- Sabor;
- Rugosidad;
- Naturaleza quebradiza (estas dos últimas si la sustancia es sólida).

Las propiedades de este tipo no se afectan sustancialmente por el tamaño de la muestra, siempre que ésta sea de magnitud razonable, por lo que son intensivas. Existen otras propiedades no tan simples que se pueden apreciar también con los sentidos, como:

- La maleabilidad (viabilidad con la que una sustancia puede transformarse en láminas delgadas mediante martilleo),

**Figura 1.9**

Los metales son dúctiles y maleables. a) metal en placa y filamento, la sustancia más dura es el diamante, pues raya al resto. b) diamante rayando vidrio)

- La ductilidad (facilidad para estirar en material en forma de hilo) o
- La dureza (propiedad relativa a la capacidad de una sustancia de rayar a otras).

Muchas otras propiedades pueden medirse con precisión y expresarse numéricamente. Incluimos a continuación algunas de ellas y te dejamos investigar algunas otras más. En relación con las unidades en las que se expresan los valores de estas propiedades, revisa la sección “HERRAMIENTA: Sistema Internacional de Unidades”.



### HERRAMIENTA:<sup>3</sup>

## Sistema Internacional de Unidades

En este libro se utiliza el Sistema Internacional de Unidades. Todos los detalles necesarios del mismo se encuentran en el Apéndice 1.

En la descripción de las propiedades físicas se han utilizado para el volumen dos unidades diferentes: el litro (para el que usaremos el símbolo L) y el centímetro cúbico ( $\text{cm}^3$ ). El litro no es una unidad recomenda-

da por el Sistema Internacional de Unidades, pero en este libro la utilizaremos como equivalente al decímetro cúbico ( $\text{dm}^3$ ). Recuerda que:

$$\begin{aligned} 1 \text{ L} &= 1 \text{ dm}^3 \\ 1 \text{ dm}^3 &= 1000 \text{ cm}^3 \\ 1 \text{ mL} &= 1 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

## Solubilidad

La masa máxima de sustancia sólida que se disuelve en 100 g de disolvente, a cierta temperatura.

**Ejemplo:** la solubilidad del cloruro de sodio en agua, a  $25^\circ\text{C}$  es de 39.12 g.

## Densidad

La masa de sustancia contenida en la unidad de volumen.

**Ejemplo:** la densidad del cloruro de sodio es de  $\delta\rho = 2.163 \text{ g/cm}^3$  o  $2.163 \text{ g/mL}$ .

## Punto de fusión (ebullición)

Temperatura a la que la sustancia líquida solidifica (a la que la sustancia líquida hierve).

**Ejemplo:** A 101.325 kPa de presión, el agua funde a  $T_f = 0^\circ\text{C}$  y hierve a  $T_b = 100^\circ\text{C}$ .

**Figura 1.10**

Aparato Fisher para determinar los puntos de fusión de los sólidos.

<sup>3</sup> Las “HERRAMIENTAS” abordan el desarrollo de habilidades matemáticas, de nomenclatura, de lógica o de manejo de unidades, que no tienen que ver directamente con el contenido en cuestión, pero que son indispensables para la resolución de problemas.

## Capacidad calorífica específica

Cantidad de energía que hace elevar la temperatura de un gramo de sustancia en un grado centígrado. Siempre que se usa el término “específico” en el SI nos referimos a un gramo de sustancia.

**Ejemplo:** A 4°C, la capacidad calorífica específica del agua líquida es  $C_p = 4.184 \text{ J}/(\text{g } ^\circ\text{C})$ .

## Viscosidad

En dos capas de un fluido, una de las cuales se mueve y la otra no, la viscosidad (o, más formalmente, coeficiente de viscosidad cinemática) se refiere a la resistencia que opone la capa en reposo a la que está en movimiento. El coeficiente de viscosidad cinemática es la fuerza (en Newtons), por unidad de área (metros cuadrados), requerida para mantener una diferencia unitaria en la velocidad de las dos capas (un metro sobre segundo).

**Ejemplo:** La viscosidad para el  $\text{N}_2$  gaseoso a 0 °C es  $\eta = 1.781 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m s})$ .



TE TOCA A TI:

### Denso y viscoso

El aceite y el agua son dos sustancias que no se mezclan. ¿Cuál de ellas es más densa? ¿Cuál es más viscosa?

Para determinar cual es más densa, recuerda que al ponerlas juntas, la más densa quedará en la parte inferior del recipiente, mientras que la menos densa quedará en la parte superior.

Para conocer cuál es más viscosa basta con ponerla entre dos dedos y frotarlos uno contra el otro. Aquella que presente más resistencia será más viscosa. Otra manera es medir el tiempo de caída de un balón en una columna con una altura dada de líquido. Las sustancias más viscosas tienen tiempos de caída mayores.



**Figura 1.11**  
Viscosímetro de bola rodante.

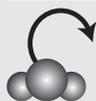
Averigua ¿por qué se utiliza el aceite como lubricante en los motores de los coches y no se utiliza el agua? ¿qué es un aceite multigrado?

## Propiedades químicas intensivas

Las propiedades químicas de las sustancias son las que se refieren a su comportamiento en las reacciones químicas.

Este tema se aborda con más profundidad en el capítulo 5. Basta por ahora dar algunos ejemplos simples:

- Los metales alcalinos tienen la propiedad de reaccionar violentamente con el agua produciendo hidróxidos.
- Los halogenuros de los metales alcalinos fundidos se descomponen por electrólisis.
- Los metales se combinan con el oxígeno para producir óxidos.
- Los hidrocarburos se queman en presencia de aire y producen dióxido de carbono y agua.



TE TOCA A TI:

**Busca otras propiedades**

Busca una definición de las siguientes propiedades y un ejemplo de su valor para una sustancia determinada a ciertas condiciones, dado en unidades del SI:

1. Tensión superficial
2. Momento dipolar
3. Coeficiente de conductividad térmica
4. Compresibilidad isotérmica

## MÉTODOS DE SEPARACIÓN DE MEZCLAS

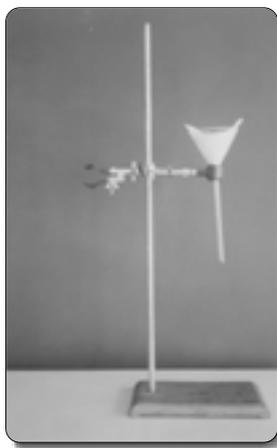
En la naturaleza, la gran mayoría de las sustancias se encuentran formando mezclas de muy diversos tipos. En multitud de casos hacemos uso de las sustancias que forman parte de una mezcla. Por ejemplo:

- Tomamos el principio activo de una medicina, que está mezclado con otros componentes y con el excipiente;
- En el hogar usamos limpiadores cuyos antisépticos están mezclados con detergentes y con agua, como vehículo.

No obstante, en muchas ocasiones es necesario, o sencillamente deseable, obtener por separado a las sustancias componentes de una mezcla, o conocer la composición de dicha mezcla. A eso se dedica el **análisis químico**.

Los componentes de una mezcla pueden concentrarse o separarse de la misma mediante procesos de separación.

Un **proceso de separación** es el que se lleva a cabo cuando se trata una mezcla para obtener ya sea cada uno de sus componentes, o mezclas más sencillas de algunos de éstos.

**Figura 1.12**

Embudo con papel filtro.

**Filtración**

Es el más sencillo de los métodos de separación. Se utiliza siempre que se desea separar un sólido de un líquido. A lo que en un laboratorio de química se llama filtrar, en la cocina se denomina colar; si en la cocina usamos un colador o un cedazo, en el laboratorio usamos un embudo con papel filtro.

**Destilación**

Consiste en llevar una mezcla líquida a ebullición en un matraz de destilación. La mezcla puede estar compuesta únicamente por líquidos **miscibles** (que se disuelven por completo uno en otro) o puede contener también algún sólido disuelto. Cada uno de los líquidos en la mezcla conserva su tendencia a evaporarse y hierve al alcanzar la cercanía de su temperatura de ebullición. El vapor que se desprende inicialmente está compuesto principalmente por el líquido con menor temperatura de ebullición ( $L_1$ ). Este vapor se hace pasar por un refrigerante o condensador, y se colecta en un recipiente (ver figura 1.13). Mientras la temperatura se mantiene más o menos constante, el vapor está compuesto casi exclusivamente por  $L_1$ . Al haberse evaporado todo  $L_1$ , la temperatura se eleva, hasta alcan-

zar la temperatura de ebullición del siguiente líquido,  $L_2$ , que podrá recolectarse en otro recipiente, y así sucesivamente. Los sólidos que hubiera en la mezcla, permanecerán en el matraz.

## DESCÚBRELO TÚ:<sup>4</sup>

### Contenido alcohólico en algunas bebidas

¿Qué porcentaje de alcohol se encuentra presente en las bebidas alcohólicas?

Los principales componentes que se encuentran en estas bebidas son el alcohol y el agua. Estos dos líquidos tienen diferentes puntos de ebullición: a nivel del mar el del alcohol (etanol) es  $78.5^{\circ}\text{C}$  y el del agua,  $100^{\circ}\text{C}$ . Esto permite utilizar el método de destilación para separar el alcohol en cada una de las mezclas de una manera bastante sencilla, ya que éste hierve antes que el agua. Para realizar una destilación, se necesita un equipo semejante al mostrado en la figura 1.13.

#### Material

- Cerveza, brandy, ron
- Matraz de bola con “t” de destilación
- Termómetro de vidrio
- Refrigerante con mangueras
- 2 soportes universales
- 2 pinzas de tres dedos con nuez
- Mechero
- 1 anillo de hierro
- Tela de alambre con asbesto
- Probeta recolectora

#### Procedimiento

Elige una bebida y coloca 30 mL en el matraz de bola. Inicia la destilación.

Vigila la temperatura del vapor generado, y asegúrate que colectas únicamente el líquido que ebulle a  $78.5^{\circ}\text{C}$  (menor si no estás al nivel del mar).

Para cada una de las bebidas, mide en una probeta el volumen de etanol obtenido en la destilación y calcula el porcentaje en volumen de alcohol contenido en cada una de ellas.

Guarda el etanol para un uso futuro.

Con esta información, realiza los cálculos necesarios para responder la pregunta inicial.

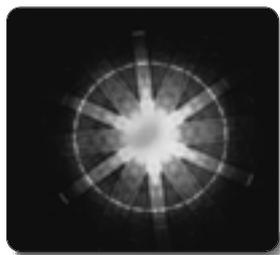


**Figura 1.13**  
Equipo de destilación del laboratorio químico.

## Cristalización

Este proceso se utiliza principalmente cuando se desea separar a un sólido disuelto (**soluto**) en un disolvente. La solubilidad de un soluto en un disolvente tiene generalmente un límite, que se mide en unidades de masa de soluto por unidades de masa o volumen de disolvente a una temperatura dada. A este límite se le conoce como **saturación** y decimos que una disolución está saturada, si no acepta la solubilización de más soluto. Así por ejemplo, se sabe que la solubilidad del cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) es de 39.12 g en 100 g de

<sup>4</sup> La sección “DESCÚBRELO TÚ” es una invitación a realizar trabajo experimental mediante la propuesta de una pregunta iniciadora a la cual hay que responder. La respuesta no se incluye, para que sea producto de la indagación práctica. En ocasiones, los materiales o procedimientos podrán ser modificados por ti, con la ayuda de tu profesor, en caso de no disponer exactamente de los que se mencionan en la obra.



**Figura 1.14**  
Cristales al microscopio.

agua, a 25°C. Si el volumen de disolvente disminuye mientras la temperatura se mantiene constante, el soluto tenderá a **crystalizar**. Como generalmente la solubilidad de un soluto aumenta con la temperatura, una disminución en ella también favorece la cristalización del soluto.

Es posible que si se tienen dos o más solutos presentes en una disolución, al evaporar parcialmente el disolvente cristalice sólo uno de ellos, el menos soluble. Éste puede separarse por filtración, para luego seguir evaporando el disolvente hasta la cristalización de un segundo soluto, y así sucesivamente. A este proceso repetitivo, en el que logran separarse entre sí solutos de una disolución gracias a sus distintas solubilidades, se le llama **cristalización fraccionada**.

## DESCÚBRELO TÚ: Cristalización fraccionada

¿Cuál es más soluble en agua, el azúcar o la sal?

Tu sabes, por experiencia, que ambas sustancias son bastante solubles en agua, pero para conocer la respuesta a la pregunta, te sugerimos llevar a cabo el siguiente experimento, que puede realizarse aun en la cocina de tu casa.

### Material

- Azúcar
- Sal
- Taza medidora
- Pocillo para calentar
- Estufa
- Filtros para café
- Vaso de vidrio
- Refrigerador

### Procedimiento

Disuelve  $\frac{1}{4}$  de taza de azúcar y  $\frac{1}{4}$  de taza de sal en una taza de agua. Calienta y agita hasta que logres la diso-

lución total de ambas. (Si observas que queda una muy pequeña cantidad de cristales sin disolverse, o alguna impureza, pasa la mezcla a través de un papel filtro para café).

Coloca ahora esta disolución en un vaso de vidrio (ten precaución para que el calor no rompa el vidrio) y cúbrela, para mantenerla libre de polvo. Déjala en reposo varios días en el refrigerador, durante los cuales podrás ir observando la aparición paulatina de cristales.

Al cabo de unos días, cuando ya no se aprecie el aumento en la cantidad de cristales formados, separa los cristales filtrando la mezcla con un filtro para café. En este caso, y *sólo en este caso* en el que las sustancias problema son conocidas e inofensivas, utiliza alguno de tus sentidos para identificar la naturaleza de los cristales.

¿Puedes ahora contestar la pregunta? ¿Requieres experimentar más?



**Figura 1.15**  
Embudo de separación.

## Extracción

El agua no es miscible en algunos líquidos, como el aceite, o en algunos disolventes orgánicos, como el cloroformo. Siempre que se agite a estos líquidos con intención de mezclarlos, éstos vuelven a separarse en dos fases al quedar en reposo. Este fenómeno, unido a la mayor o menor solubilidad en agua de cierto tipo de solutos comparada con su solubilidad en otros disolventes orgánicos no miscibles en agua, constituye la base de un método de separación conocido como **extracción**.

Supongamos que tenemos una disolución acuosa en la que se hallan disueltos dos solutos, uno de los cuales,  $S_1$ , es soluble en cloroformo (o algún otro disolvente no miscible en agua) y el otro,  $S_2$ , no. Al añadir cloroformo sobre esta disolución acuosa y agitar,  $S_2$  permanecerá en el agua, mientras que  $S_1$  será **extraído**, al menos parcialmente, por el cloroformo. Este procedimiento se lleva a cabo en un embudo de separación, como el que se muestra en la figura 1.15. Qué tanto  $S_2$  permanezca en el agua y qué tanto pase al cloro-

formo, dependerá de la particular afinidad que tenga  $S_2$  por cada uno de estos dos disolventes. Por lo general, es necesario repetir el proceso varias veces, separando las dos fases y añadiendo cloroformo puro de nuevo a la disolución acuosa.

## DESCÚBRELO TÚ: Cafeína en una bebida de cola

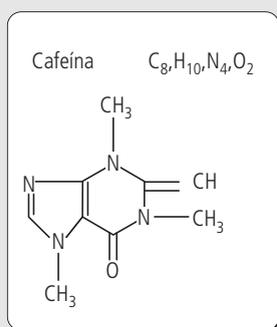
Con la colaboración de Rosa María González Muradas.

¿Hay cafeína en la Coca-Cola®?

La cafeína es una sustancia orgánica cuya fórmula condensada es:  $C_8H_{10}N_4O_2$  y cuya fórmula desarrollada es la de la figura 1.16.

Esta sustancia es soluble en agua. Sin embargo tiene más afinidad por algunos disolventes orgánicos, como el cloroformo,  $CHCl_3$ , que a su vez es casi inmisible en agua. Se sabe también que forma cristales en forma de aguja y que tiene un punto de fusión de  $238^\circ C$ .

Es posible entonces, mediante una **extracción**, separar a la cafeína de una disolución acuosa, como puede ser una Coca-Cola o un café, utilizando cloroformo. Al evaporar el disolvente se obtendrá un sólido que podrás identificar por su forma cristalina y punto de fusión.



**Figura 1.16**  
Fórmula desarrollada de la cafeína.

**Material:**

- Embudo de separación
- Cloroformo
- Coca-cola y/o café preparado
- Cápsula de porcelana
- Parrilla de calentamiento
- Campana de extracción

**Procedimiento**

Coloca 50 mL de Coca-Cola en un embudo de separación y agrega 50 mL de cloroformo. Agita diez veces, abriendo la llave del embudo después de cada agitación (para liberar la presión generada por la agitación). Deja reposar hasta que haya una buena separación de las dos fases. Vacía en una cápsula de porcelana el cloroformo que contiene la cafeína extraída.

Destila el cloroformo de la disolución al baño María (guarda el destilado para llevar a cabo otro experimento) hasta que el sólido disuelto quede seco en el matraz. En caso, evapora a sequedad sobre una parrilla, dentro de una campana de extracción (los vapores de cloroformo son tóxicos).

Identifica el residuo sólido obtenido. ¿Cómo podrías saber que es cafeína?

Puedes realizar el experimento con café preparado y comparar los sólidos extraídos en ambos casos.

## Cromatografía

Esta es una de las técnicas de separación que más ha evolucionado con la tecnología moderna. Los principios de la cromatografía se emplean para separar sólidos de sólidos (en disolución), líquidos de líquidos y gases de gases. La idea fundamental de la cromatografía es que los componentes de la mezcla que se desean separar se distribuyen entre dos fases, una de las cuales es fija o estacionaria y la otra, la fase móvil, se desplaza a través de la primera. A este paso de la fase móvil a través de la estacionaria se le conoce como proceso de **elución**.

La raíz *chromos* (color) en la palabra cromatografía tiene razones puramente históricas. Parece sugerir que el color es lo que distingue a los componentes de la mezcla, y lo que los hace separables, pero el color no tiene nada que ver en ello.

La primera descripción detallada de una cromatografía se atribuye a Michael Tswett, un bioquímico ruso, quien aisló la clorofila de una mezcla de pigmentos vegetales, en



**Figura 1.17**

Columna cromatográfica. Según eluye la mezcla, se colocan varios recipientes para recibir a sus diferentes componentes.

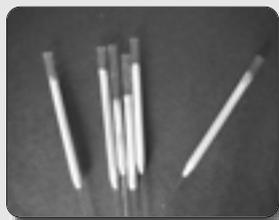
1906. Colocó una pequeña muestra en la parte superior de una columna empacada con polvo de carbonato de calcio y enseñó a eluir la muestra con éter de petróleo (ver figura 1.17). A medida que la muestra iba descendiendo por la columna, se iba separando en distintas bandas que se desplazaban a velocidades diferentes. Las bandas tenían diversos colores, debido a la naturaleza de los pigmentos de la mezcla, de ahí el nombre dado al proceso, aun cuando los colores eran accidentales y nada tenían que ver con el principio del método.

## DESCÚBRELO TÚ: Colorantes en la gelatina

Con la colaboración de Rosa María González Muradas

¿Cuántos colorantes puedes identificar en un polvo para preparar gelatina?

Los colorantes utilizados en los alimentos están formados por moléculas orgánicas bastante complejas. Las diferencias en los colores de distintas sustancias son causadas por diferencias en la estructura molecular que también hacen ligeramente distinta su solubilidad. Estas diferencias son las que nos permiten aplicar el método de la **cromatografía en columna** para separar una mezcla de este tipo de sustancias. Realizarás la separación en una microcolumna.



**Figura 1.18**

Microcolumna de este experimento.

*Material:*

- Polvo de gelatina de color fuerte (uva, frambuesa, etc.)
- Pipeta Pasteur
- Algodón
- Silica gel (para cromatografía en columna)
- Alcohol etílico
- Cloruro de sodio

*Procedimiento:*

Coloca una pequeña torunda de algodón en el fondo de una pipeta Pasteur (cuida que no penetre en el capilar). Rellena con sílica-gel hasta el tercio superior de la pipeta e introduce otra torunda de algodón.

Disuelve un poco de polvo de gelatina de sabor en una mezcla alcohol-agua en iguales proporciones de volumen y agita para disolver.

Agrega dos gotas de la disolución anterior dentro de la microcolumna.

Agrega 5 mL de disolución de cloruro de sodio al 1%.

¿Cuántos colorantes diferentes logras identificar?



TE TOCA A TÍ:

## Otros procesos de separación

1. Consulta en libros de química otro tipo de procesos de separación diferentes a los enunciados. A continuación te damos algunas ideas:
  - Centrifugación
  - Separación isotópica
  - Destilación por arrastre de vapor

- Electroforesis
- Precipitación electrostática

2. Investiga de qué forma se llevan a cabo en la industria las operaciones de filtrado, destilación y extracción. Cita ejemplos de aplicación en algún proceso industrial específico.

DEL PASADO:<sup>5</sup>

## Metales, elementos; gemas, mezclas

Hay varios metales “nativos”, como el oro, la plata o el platino, que existen en la naturaleza en forma elemental, es decir, como elementos más o menos puros. Otros metales se encuentran naturalmente en forma de minerales. En los minerales, los metales están combinados con otros elementos y forman compuestos. De los minerales se puede extraer el metal, pero para ello hay que hacer una serie de transformaciones químicas que dependen del mineral en cuestión.

La metalurgia es el estudio del comportamiento físico y químico de los elementos metálicos y sus mezclas (aleaciones). La metalurgia extractiva es el conjunto de disciplinas que se utilizan para extraer metales de sus yacimientos. También incluye su transformación posterior para que puedan ser utilizados con diferentes propósitos.

Hace quizá seis mil años comenzó la extracción del cobre, el primer metal obtenido en minas. Desde entonces, la obtención de los metales se convirtió en algo indispensable para la evolución de las distintas civilizaciones y se dejó atrás a la “Edad de Piedra”. Durante siglos, la metalurgia fue un saber empírico relacionado, en muchos de sus aspectos, con rituales, magia y sobre todo con la alquimia, en occidente. Desde la antigüedad más remota la metalurgia ha sido una de las actividades a la que el hombre ha dedicado grandes esfuerzos.

Los metales extraídos han tenido siempre distintas utilidades. Para los incas, el oro era una representación del Sol, su principal divinidad. El cobre, el bronce —aleación de cobre y estaño— y el hierro por ejemplo, se empleaban principalmente en la construcción de utensilios de defensa y caza, mientras que el oro y la plata para hacer adornos y joyas.

La metalurgia avanzó notablemente en Latinoamérica durante el período colonial. Uno de los propósitos de la metrópoli fue la extracción de metales preciosos, por lo que propició el conocimiento sobre estos temas y

el asentamiento aquí del liderazgo mundial en diversas ramas de la mineralogía. En la Nueva España, gracias al ingenio de Bartolomé de Medina, se ideó el proceso de amalgamación en frío de la plata con mercurio, en 1555, el cual fue vuelto a descubrir en Austria por el barón De Born dos siglos más tarde. Muy diversos adelantos minero-metalúrgicos se dieron asimismo en el Reino del Perú. En 1792 se instala en la Nueva España el Real Cuerpo de Minería, dirigido por Fausto de Elhúyar. Quizás don Fausto haya sido el primer profesor de química en Hispanoamérica.

Las piedras preciosas que coronan las piezas de oro y plata son las gemas, minerales de gran belleza, durabilidad y rareza. Su especial atractivo ha fascinado a todas las sociedades de todas las épocas, como lo ha hecho el brillo y el color del oro. Los pueblos primitivos les asociaron capacidades maravillosas, desde curativas hasta mágicas.

El uso de las piedras preciosas en joyería comenzó en las antiguas civilizaciones orientales. El Imperio Romano, relacionado comercial y bélicamente con el mundo oriental, se contagió de este gusto por las joyas y adoptó exageradamente su uso. El contacto de los reinos europeos con el mundo oriental durante las cruzadas, llevó a Europa multitud de gemas desconocidas hasta entonces. En América, el caudal de piezas del Museo del Oro, en Colombia o Perú, o el tesoro de Monte Albán o de Palenque, en México, son muestra del uso de las piedras preciosas y el oro en utensilios de adorno y rituales.

Las gemas tienen características particulares que las distinguen. Comparemos el zafiro, de color azul, con el rubí, de brillante color rojo. La composición química de ambos es el corundum:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de aluminio). No se trata ahora de un elemento, sino de un compuesto formado por la combinación química de dos elementos. Cuando está puro, este compuesto es incoloro ¿por qué entonces una de las piedras preciosas men-



**Figura 1.19**

Figurilla de oro del Museo del Oro del Banco de la República, en Bogotá, Colombia.



**Figura 1.20**

Cristal de roca.

<sup>5</sup> La sección “DEL PASADO” recoge un pasaje histórico sobre un tema o un personaje crucial en el desarrollo de la ciencia. La idea es que te percatas de que la actividad científica es desarrollada por seres de carne y hueso, quizás un poco más incisivos y con más conocimientos y suerte que el resto de los mortales.

**Figura 1.21**

La esmeralda. Se trata del mineral llamado “berilo” (un aluminosilicato de berilio:  $3\text{BeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ ) en el que una pequeñísima fracción del aluminio está sustituido por cromo.

cionadas es roja y la otra es azul? La diferencia se debe a impurezas de otros átomos metálicos. En el rubí, algunos iones aluminio,  $\text{Al}^{3+}$ , han sido reemplazados por

cromo,  $\text{Cr}^{3+}$  (ion que se denomina “cromóforo”, porque es el responsable del color), mientras que en el zafiro la impurezas son de titanio y hierro. Igualmente, el aguamarina y el jade toman su color por un mecanismo similar, pero el metal que provoca la impureza es el hierro; en la turquesa y la malaquita es el cobre. Todas estas gemas son sustancias impuras. La impureza es lo que les da la belleza, por lo que, en estos casos no resulta importante separar la mezcla que forma las gemas para obtener sustancias puras.

En la tabla 1.2 se presenta una serie de gemas, su fórmula química, el color y el cromóforo responsable.

**Tabla 1.2**

Algunas gemas.

Gema	Fórmula	Color	Cromóforo
Granate	$(\text{Mg}, \text{Fe(III)})_2\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Rojo	$\text{Fe}^{2+}$
Amatista	$\text{SiO}_2$	Violeta	$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{4+}$ (IV)
Aguamarina	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Azul	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$
Diamante	C	Claro	Ninguno
Esmeralda	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	Verde	$\text{Cr}^{3+}$
Alejandrina	$\text{Al}_2\text{BeO}_4$	Rojo/Verde	$\text{Cr}^{3+}$
Rubí	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Rojo	$\text{Cr}^{3+}$
Crisolita	$(\text{Mg}, \text{Fe(III)})_2\text{SiO}_4$	Amarillo/Naranja	$\text{Fe}^{2+}$
Zafiro	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Azul	$\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ (IV)
Ópalo	$\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$	Opalescente	Ninguno
Topacio	$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}, \text{F})$	Incoloro	Ninguno
Turquesa	$\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Azul	$\text{Cu}^{2+}$



CTS<sup>6</sup> Industrial:

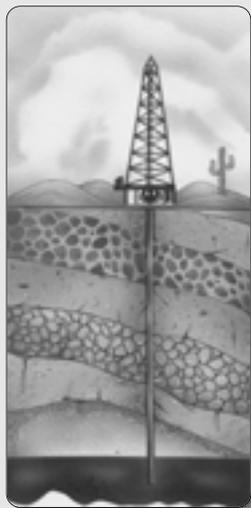
## Destilación del petróleo

El petróleo es una mezcla en la que coexisten las fases sólida, líquida y gaseosa. La mayor parte de sus componentes son hidrocarburos (nombre que se da a los compuestos que solamente presentan carbono e hidrógeno), aunque contiene también compuestos con otros elementos adicionales, como nitrógeno, azufre, oxígeno o metales. A través de procesos de transformación industrial se obtienen de él productos de alto valor, como combustibles, lubricantes, ceras, disolventes y derivados petroquímicos.

## El proceso de formación del petróleo

El petróleo es el producto de descomposición de la materia orgánica proveniente de plantas y animales, acumulada en cuencas marinas y lacustres, y sometida a procesos geoquímicos durante cientos de millones de años. La sedimentación y el enterramiento propiciaron poco a poco la formación de un ambiente rocoso. En los poros microscópicos de esta roca sedimentaria, la

<sup>6</sup> Este libro utilizará frecuentemente la sección “Ciencia–Tecnología–Sociedad” (CTS). Su pretensión es mostrar la utilidad de los aspectos científicos y tecnológicos para el desarrollo social. Su contenido variará, para incluir temas de la química y la tecnología en el hogar, la industria, el cuidado ambiental, la salud y los nuevos materiales, entre otros.

**Figura 1.22**

Esquema de un entrapamiento de petróleo. En cada pozo es diferente la proporción de gas natural y de petróleo crudo.

descomposición formó hidrocarburos gaseosos y ello propició una gran elevación de la presión.

Las formaciones geológicas en las que existe petróleo son entrapamientos (ver figura 1.22) con los siguientes dos elementos:

- Una roca almacenadora, con petróleo dentro de sus poros. En la parte superior se encuentra el **gas natural** (petróleo gaseoso) y debajo el llamado **petróleo crudo** (petróleo líquido).
- Una fractura geológica, un domo salino o una roca impermeable a su alrededor, que evita que el petróleo fluya hacia la superficie o hacia los lados.

Basta hacer una perforación (pozo, ver figura 1.23) para que la alta presión del entrapamiento lleve al petróleo crudo y al gas natural hacia la superficie. Por supuesto, la profundidad y la naturaleza geológica de las capas que haya que perforar hace más o menos costosa y factible la construcción del pozo.

Llega un momento en que el petróleo empieza a dejar de fluir hacia la superficie, lo cual no quiere decir que el pozo se haya agotado, ya que la roca sigue empapada del fluido, sino que la presión ha disminuido. Lo que procede entonces es iniciar la recuperación secundaria del crudo, que consiste de la inyección profunda de agua (la densidad del petróleo es menor y flota en aquella), o bien la recuperación mejorada, mediante la inyección de vapor, gases, surfactantes, polímeros, entre otros procesos que están actualmente a prueba.

Finalmente, el pozo se agota, tarde o temprano. Se estima que las reservas mundiales de petróleo durarán todavía unas cuantas décadas, de tal forma que antes de concluir el siglo XXI seguramente la humanidad tendrá que enfrentarse a un mundo sin este recurso.

**Figura 1.23**

Pozo de petróleo en Venezuela.

## Importancia económica del petróleo

El petróleo es la fuente más importante de la energía mundial. En 1995 se produjeron  $3.81 \times 10^{17}$  J de energía en todo el mundo, de los cuales  $1.5 \times 10^{17}$  J procedieron del petróleo crudo (39.2%) y  $0.82 \times 10^{17}$  J del gas natural (21.5%), es decir, 60.7% de la energía mundial proviene actualmente del petróleo.

Es notablemente diferente la distribución de países con mayor producción y con mayor consumo del petróleo (ver tabla 1.3). Este punto de la comercialización del crudo adquiere entonces una importancia estratégica capital para las relaciones entre el primero y el tercer mundos.

**Tabla 1.3**

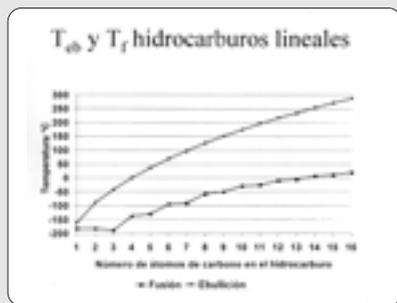
Los diez primeros países productores y consumidores de petróleo crudo en el mundo en 1998. Los datos son millones de barriles diarios (MMBPD). Un barril de petróleo son 159 L.

PRODUCCIÓN		CONSUMO	
País	MMBPD	País	MMBPD
Arabia Saudita	8.28	Estados Unidos	17.72
Comunidad de Estados Independ.	7.09	Japón	5.72
Estados Unidos	6.34	China	3.32
Irán	3.61	Rusia	2.93
China	3.2	Alemania	2.87
Noruega	2.77	Italia	1.97
Venezuela	3.12	Corea del Sur	1.96
México	3.01	Francia	1.91
Reino Unido	2.63	Reino Unido	1.84
Emiratos Árabes	2.28	México	1.0

En 1995, América Latina contribuyó a la producción mundial con 8.10 millones de barriles diarios, que correspondió a 13% del total. Entre los países de la región destacan Venezuela (2.75 millones) y México (2.62). En un segundo plano están Argentina (0.72), Brasil (0.70), Colombia (0.59) y Ecuador (0.39).

## Destilación del gas natural

La figura 1.24 presenta las temperaturas de fusión y ebullición de los hidrocarburos gaseosos y líquidos de uno a dieciséis átomos de carbono. Podemos ver que el más ligero, llamado metano, permanece como líquido sólo en un pequeño intervalo de  $20^\circ$ , entre  $-182^\circ\text{C}$ , que es su temperatura de fusión, y  $-162^\circ\text{C}$ , la de ebullición.



**Figura 1.24**

Intervalo de temperaturas a las que los hidrocarburos saturados permanecen en estado líquido, a presión atmosférica normal. La curva inferior corresponde a la temperatura de fusión y la de ebullición está en la superior.

Entre tanto, el hidrocarburo de 16 átomos de carbono es un líquido entre  $18^\circ\text{C}$  y  $287^\circ\text{C}$ . Es precisamente la diferencia en las temperaturas de ebullición la que puede aprovecharse para separarlos mediante destilación.

La instalación industrial que aprovecha las diferentes temperaturas de ebullición de los hidrocarburos más ligeros (de uno a cuatro átomos de carbono) para separarlos se llama planta criogénica. Lleva ese nombre debido a las bajas temperaturas necesarias para mantener líquido al gas natural y proceder a su destilación.

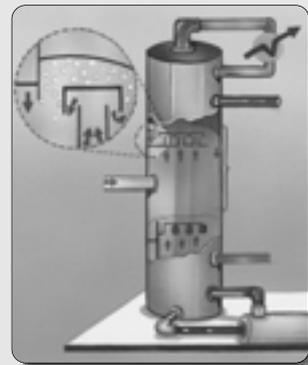
**Criogenia:** la producción de bajas temperaturas o el estudio de los fenómenos a baja temperatura.

En efecto, el gas natural que sale del pozo petrolero se condensa mediante refrigeración y se alimenta como líquido a la serie de torres de destilación industrial del proceso criogénico. En cada una de las torres (ver figura 1.25) se alimenta calor al líquido de los fondos de la torre en un rehervidor, lo que lo convierte en vapor que sube debido a su baja densidad. A la vez, en el condensador se elimina calor del vapor del domo de la torre, lo que lo licua y lo hace descender al reinyectarlo a la torre.

De esta manera, a lo largo de la torre existe un líquido descendente y un vapor ascendente que se ponen en contacto íntimo en sus “platos”. La muestra el detalle de un plato, en que el vapor penetra por debajo y burbujea en el líquido que descende del plato superior, mantenido allí por la altura de un vertedero. En un plato, el vapor que sale hacia arriba es más rico en los

**Figura 1.25**

Torre desmetanizadora. El gas natural se alimenta como líquido a la mitad de la torre. El vapor del domo es licuado en un condensador y vuelto a alimentar. El líquido del fondo se evapora en un rehervidor. En la parte superior izquierda se observa el detalle del paso de líquido y vapor en un plato de la torre desmetanizadora.



componentes más volátiles de la mezcla, mientras que el líquido que descende al plato inferior está enriquecido en los componentes pesados. Ésta es la razón de que la temperatura en cada plato de la torre sea ligeramente diferente a la del anterior: los platos más altos tienen una temperatura menor que los más bajos. La acción del conjunto de platos, que pueden ser de unos pocos a una centena, es concentrar en los domos al componente más volátil, en este caso el metano.

El resultado final obtenido en la torre desmetanizadora es un condensado en lo alto del domo constituido casi únicamente por metano y un líquido del fondo que es una mezcla del resto de los hidrocarburos. Ésta se alimenta entonces a la segunda torre (ver figura 1.26) que separará el segundo hidrocarburo y así, sucesivamente cada uno de los componentes esenciales del gas natural.

Más adelante en este libro quedará claro cómo estas sustancias gaseosas son cimiento de la industria petroquímica actual.



**Figura 1.26**

Planta criogénica.

## PROBLEMAS Y ACTIVIDADES

1. Indica si los siguientes procesos te parecen cambios físicos o cambios químicos, es decir, sugiere si se forma en ellos, o no, una nueva sustancia. Discute con tus compañeros y con tu profesor. Por cierto, no te preocupes si aparecen discrepancias graves al respecto.
  - a) Deformación de un plástico moldeable;
  - b) Ennegrecimiento de un cristal líquido por el paso de la corriente;
  - c) Mantequilla que se enrancia;
  - d) Incandescencia del alambre de tungsteno de un foco;
  - e) Hidratación de una sal anhidra;
  - f) Imanación de un pedazo de hierro por el contacto con un imán;
  - g) Calentamiento del agua para bañarse;
  - h) Horneado de un pastel;
  - i) Corrosión de la varilla en un edificio;
  - j) Preparación de un té;
  - k) Cocción de un huevo;
  - l) Luxación de un hueso;
  - m) Floración de una planta;
  - n) Combustión del alcohol;
  - o) Un golpe de raqueta sobre una pelota;
  - p) Refinación de la gasolina;
  - q) Secado de una pintura aplicada sobre la pared;
  - r) Verter agua de una jarra sobre un vaso;
  - s) Combustión de una vela;
  - t) Engrapado de una hoja de papel;
  - u) Quitar una mancha con un líquido orgánico;
  - v) Sufrir una quemadura de la piel al asolearse.
2. Clasifica las siguientes propiedades como físicas o químicas:
  - a) Inflamabilidad
  - b) Densidad
  - c) Volatilidad
  - d) Tendencia a la corrosión
  - e) Temperatura de rocío
  - f) Tendencia a la oxidación
3. Clasifica las siguientes como sustancias puras o como mezclas:
  - a) Tinta de tu pluma
  - b) Café en una taza
  - c) Cubo de azúcar
  - d) Pedazo de cal
  - e) Yeso
  - f) Latón
  - g) Anillo de plata
  - h) Bolsa de polietileno
  - i) Bolsa llena de detergente comercial
4. Indica si las siguientes propiedades son intensivas o extensivas:
  - a) El color azul del sulfato de cobre hidratado sólido
  - b) La masa de un pedazo de acero
  - c) El importe de la gasolina cuando llevas un auto va a la gasolinera
  - d) La temperatura de fusión del tungsteno de los focos
  - e) El color amarillo de la luz de sodio
  - f) El volumen que ocupa un gramo de cierta margarina
  - g) La energía química almacenada en un gramo de cierto petróleo
  - h) El volumen de hielo en diferentes muestras
5. El *Journal of Chemical Education* es la revista más prestigiada en educación de la química. Consulta alguno de los siguientes artículos para llevar a cabo un experimento de cromatografía, sea en columna o en papel, con la ayuda de tu profesor (los artículos están ordenados del

más reciente al más antiguo y al final de cada uno se incluyen tres números, que corresponden a: año de aparición, volumen de la revista y página inicial):

- a) Anwar, Jamil; Nagra, Saeed Ahmad; Nagi, Mehnaz Thin-Layer Chromatography: Four Simple Activities for Undergraduate Students, 1996 73 977.
  - b) Rowe, H. Alan. An inexpensive gel-filtration chromatography experiment: A simple biochemical laboratory exercise for high school and undergraduate students who make their own column and apply simple detection techniques. 1993 70 415
  - c) Reynolds, Ronald C.; O'Dell, C. Allen. A thin-layer and column chromatography experiment adapted for use in secondary schools: A quick, safe, colorful, convenient introduction to two basic techniques. 1992 69 989.
  - d) Wigman, Larry S.; Kelsch, Catherine T. Separation science and chromatography: A colorful introduction. 1992 69 991.
  - e) Lehky, Pavel. Simple, inexpensive and reliable do-it-yourself chromatography columns. 1977 54 227.
  - f) Wyler, Hugo; Chevreux, Pierre. Simple chromatography column. 1978 55 270.
  - g) McCullough, Thomas; Lechtenberg, Andre. A short, intensive experiment in paper chromatography. 1970 47 141.
  - h) Stiles, D. A. Experiments in paper chromatography. 1970 47 688.
6. Sugiere un método para separar los componentes de las siguientes mezclas (Discute tus propuestas con el profesor):
    - a) Mezcla de gis pulverizado y sal de mesa.
    - b) Disolución de azúcar en agua.
    - c) Disolución de sal en una mezcla de alcohol y agua.
    - d) Aceite esencial a partir de cortezas de limón.
  7. Con la ayuda de una balanza y un termómetro, diseña un experimento mediante el cual puedas confirmar la solubilidad del cloruro de sodio en agua a 25°C. Estima luego la solubilidad del azúcar o del bicarbonato de sodio en agua a la misma temperatura.
  8. El yodo sólido es algo soluble en agua si se agrega además un poco de yoduro de potasio. Observa el color de la disolución acuosa de yodo. Agrega un poco de tetracloruro de carbono, agita, y ve qué sucede. Idea entonces un método para separar al yodo de una disolución acuosa. Al terminar, recupera el tetracloruro de carbono por medio de una destilación. Para las preguntas 9 a 15, consulta el apéndice 1.
  9. Expresa las siguientes cantidades con prefijos del SI. La idea es que siempre resulte una cantidad con uno, dos o tres dígitos antes del punto decimal, seguida de una unidad con prefijo.
    - a) 524400 g
    - b) 0.000134 m
    - c) 0.000724 s
    - d) 0.0012 mol
    - e) 23345 K
    - f) 345250 kg
    - g) 101325 Pa
  10. Elimina los prefijos del SI en las siguientes propiedades o cantidades y escríbelas en términos de unidades básicas, o derivadas, en notación científica exponencial.
    - a) Tiempo de vida media del uranio-238,  $\tau_{\frac{1}{2}} = 142$  Ps.
    - b) Presión atmosférica al nivel del mar,  $P = 0.1013$  MPa.
    - c) Energía necesaria para vaporizar un kilogramo de agua  $E = 2257500$  J.
    - d) Coeficiente de expansión térmica del benceno, a presión atmosférica y 20°C,  $\alpha = 1.237$  (kK)<sup>-1</sup>.
  11. Expresa las siguientes cantidades en la unidades indicadas:
    - a) 0.00217 s en  $\mu$ s
    - b) 0.008 MJ en mJ
    - c) 0.000000017 mg en ng
    - d) 131800 cm<sup>3</sup> en m<sup>3</sup>
    - e) 7.96 m<sup>2</sup> en mm<sup>2</sup>
  12. A partir de la definición dada para la viscosidad, que involucra una fuerza por unidad de área y de intervalo de velocidad, deriva que las unidades de esta propiedad son kg/(m s).

13. En la siguiente ecuación, calcula las unidades de la constante de los gases,  $R$ ;  $V$  es un volumen en metros cúbicos,  $P$  es la presión en pascales,  $n$  la cantidad de sustancia, en mol, y  $T$  la temperatura en Kelvin.

$$R = \frac{PV}{nT}$$

14. Busca en la biblioteca un manual o un libro de datos que tenga tablas de propiedades de las sustancias y recoge los siguientes datos expresados en las unidades del Sistema Internacional:
- Densidad del osmio sólido
  - Temperatura de fusión del benceno
  - Temperatura de sublimación del  $\text{CO}_2$  sólido
  - Capacidad calorífica del aluminio sólido
  - Viscosidad del tetracloruro de carbono,  $\text{CCl}_4$
  - Tensión superficial del agua líquida
  - Solubilidad del carbonato de sodio en agua
15. Transforma las propiedades anteriores a las siguientes unidades (si no conoces alguna busca su significado):
- $\text{g/cm}^3$
  - $^\circ\text{C}$
  - $^\circ\text{C}$
  - $\text{cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$
  - poise
  - $\text{dina/cm}^2$
  - kg de soluto por cada  $\text{dm}^3$  de agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- Glasstone, S., *Textbook of Physical Chemistry*, Macmillan, Nueva York, 2ª edición, 1946.
- McGlashan, M.L., *Physicochemical Quantities and Units*, Royal Institute of Chemistry, London, 1971.
- Mortimer, R.G., *Physical Chemistry*, Benjamin, California, 1993.
- Nassau, K., The causes of color, *Sci. Am.* **243**[4], 106-123, 1980.
- Pauling, L., *General Chemistry*, W.H. Freeman, San Francisco, 1947.
- Pauling, L., *Química General*, Aguilar, Madrid, 1977.

**ÍNDICE CAPÍTULO 1****A**

Agua

gas de, 16

Aguamarina, 28

Alotrópica

forma, 16

Análisis químico, 22

**B**

Barril de petróleo, 29

Bronce, 27

**C**

Cafeína, 25

Cambio

físico, 15

químico, 16

Capacidad calorífica específica, 21

Centrifugación, 26

Cloruro de sodio

densidad, 8

solubilidad, 23

Cobre, 27

Color, 19

Compuesto, 18

Condensador, 30

Conductividad térmica, 22

Corundum, 27

Criogenia, 30

Criogénica

planta, 30

Cristalización, 23

Cristalización fraccionada, 24

Cromatografía, 25

ejemplos de procesos de separación, 30

Cromóforo, 28

**D**

Densidad, 20

Destilación, 22

Torre de, 30

Disoluciones, 18

Disolvente, 23

Ductilidad, 20

Dureza, 20

**E**

Electroforesis, 26

Elemento, 18

Elhúyar, Fausto de, 27

Elución, 25

Embudo de separación, 25

Energía

mundial, 29

Estado de agregación, 19

Extracción, 24

**F**

Fenómeno

físico, 15

químico, 16

Filtración, 22

**G**

Gas natural, 29

Gemas, 27

Glasstone, Samuel, 15

**H**

Hexadecano, 30

Hidrocarburos

temperaturas de fusión y ebullición, 30

Hierro, 27

**J**

Jade, 28

**L**

Litro, 20

**M**

Malaquita, 28

Maleabilidad, 19

Masa, 19

Materia, 17

clasificación de la, 18

Medina, Bartolomé de, 27

Metales, 27

Nativos, 27

Metalurgia, 27

Metano, 29

Mezcla, 18

Heterogénea, 18

Homogénea, 18

Mezclas, 18

procesos de separación, 22

Minerales, 27

Miscibilidad, 22

Momento dipolar, 22

**O**

Olor, 19

Oro, 27

Óxido

de aluminio, 27

de hierro(III), 26

**P**

Pauling, Linus, 16

Peso

y masa, 19

Petróleo, 28

Entrampamiento, 29

Petróleo crudo, 29

Producción y consumo mundial, 29

Piedras preciosas, 27

Plata, 27

Platino, 27

Plato

de una torre de destilación, 30

Pozo de petróleo, 29

Precipitación electrostática, 26

Producto, 26

Propiedades

Extensivas, 19

Físicas, 19

Intensivas, 19

Químicas, 21

Propiedades de las sustancias, 19

Punto de ebullición, 20

Punto de fusión, 20

**R**

Reactivo, 16

Recuperación mejorada de crudo, 29

Recuperación secundaria de crudo, 29

Rehervidor, 30

Rubí, 27

Rugosidad, 19

**S**

Sabor, 19

Saturación, 23

Separación, 22

Separación isotópica, 26

Sistema Internacional de Unidades, 20, 32

Solubilidad, 20, 23

Solute, 23

Sustancias

pura, 18

impuras, 28

**T**

Tensión superficial, 22

Torre de destilación, 30

Tswett, Michael, 25

Turquesa, 28

**V**

Vapor

arrastre de, 26

Viscosidad, 21

**Z**

Zafiro, 27

# Elementos, compuestos y periodicidad

## TEMARIO

CON ESCEPTICISMO: Alquimia: ¿Un desperdicio de tiempo? 35
LA ALQUIMIA: MITO Y REALIDAD DE UNA FILOSOFÍA OCULTA 36
Introducción: Un testimonio de la Edad Media 36
No todo lo que reluce es oro ni todos los que se decían alquimistas lo eran 37
Las corrientes de pensamiento que llevaron a la alquimia 38
El nacimiento de la alquimia 40
De herméticos a alquimistas y químicos 42
LA MATERIA SE TRANSFORMA: ELEMENTOS 43
Elementos químicos 44
DESCÚBRELO TÚ: Los componentes del agua 44
HERRAMIENTA: Los símbolos de los elementos 46
DESCÚBRELO TÚ: ¿Elemento o compuesto? 47
QUÍMICA IBEROAMERICANA: Elementos descubiertos y producidos 47
Análisis químico elemental 49
TE TOCA A TI: Composición en peso 50
LA HIPÓTESIS ATÓMICA 52
Antecedentes del modelo atómico de Dalton 53
Los postulados del modelo atómico de Dalton 54
Los pesos atómicos relativos de Dalton 54
TE TOCA A TI: Relación de átomos 57
LA MATERIA SE TRANSFORMA: MOLÉCULAS Y FÓRMULAS 57
Ley de los volúmenes en combinación 57
Hipótesis de Avogadro 58
Los pesos atómicos de Cannizzaro 59
DESCÚBRELO TÚ: Moléculas diatómicas, fórmulas y pesos atómicos 59
Fórmulas químicas 61
INTRODUCCIÓN A LA TABLA PERIÓDICA 62
La construcción de la tabla periódica de Mendeleiev 64
Tabla periódica larga 67
TE TOCA A TI: La predicción de las propiedades 68
DESCÚBRELO TÚ: Metal o no-metal 69
DESCÚBRELO TÚ: Sales a la llama 69
DEL PASADO: Dimitri Mendeleiev 70
PROBLEMAS Y ACTIVIDADES 71
BIBLIOGRAFÍA 72



### CON ESCEPTICISMO:

## Alquimia: ¿un desperdicio de tiempo?

Debajo de la primera columna de la mezquita de Córdoba en España se encuentra enterrado un rayo de Sol. Transcurridos 8000 años se convertirá en oro.

Esto, cuenta la leyenda, lo afirmó el alquimista árabe Ave-roes. ¿Será cierto? ¿Es posible enterrar un rayo de Sol? ¿Se puede convertir un rayo de Sol en oro? ¿Qué es ser un alquimista? Si un alquimista es aquella persona que practicaba la alquimia, entonces, ¿qué era la alquimia? ¿Qué herencia legó la alquimia a la química moderna?

La lectura del siguiente ensayo te dará elementos suficientes para apreciar de qué manera la humanidad avanzó durante el período Neolítico y la Edad Media en el conocimiento de los metales y los minerales, así como de los mitos que perduran alrededor del trabajo de los alquimistas, mezcla de ocultismo, astrología y magia con simbolismos religiosos, en busca de la divinidad y la perfección.



**Figura 2.1**  
Mezquita de Córdoba en España.



**Figura 2.2**  
El alquimista.



**Figura 2.3**  
Horacio García Fernández  
UNAM.

## LA ALQUIMIA: MITO Y REALIDAD DE UNA FILOSOFÍA OCULTA

Por Horacio García Fernández

*“Pero Diotima, ¿quiénes son los que filosofan, si no son ni los sabios ni los ignorantes?”.*

Platón, *El banquete*

### Introducción: un testimonio de la Edad Media

La primera gran obra de la literatura británica es el poema *Cuentos de Canterbury* de Geoffrey Chaucer (1338?-1400). El autor tenía aproximadamente 50 años de edad, cuando en 1386 escribió esta serie de cuentos en verso, con la que nos transmitió una imagen muy clara de la sociedad de la que formaba parte. Unos cuentos pretenden divertir a sus lectores, cosa que logran aun con nosotros lectores de inicios del siglo XXI, pero otros tienen la intención de servir de estímulo a la reflexión de aquellos lectores ingleses de finales del siglo XIV, sus compatriotas, a fin de prevenirlos sobre la inconveniencia de dejarse llevar por sus ambiciones y pasiones. Uno de estos cuentos de sentido ético, probablemente el único creado originalmente por Chaucer, es el “Cuento del paje del canónigo” y su tema es precisamente la alquimia, pero la alquimia tal y como era percibida por la gente común y corriente de aquella época, por el público que, como Chaucer, *tenía noticia de su existencia, y quizá había leído sobre ella, pero no la practicaba.*

En el cuento mencionado escribe el autor refiriéndose a la alquimia:

*Por lo que a mí atañe, ya no quiero saber nada de esta ciencia. Escuchad lo que de ella dicen los auténticos alquimistas.*

*He aquí uno de los comentarios que hace Arnaldo de Vilanova en su tratado de **Rosarium filosoforum**, éstas son sus palabras: “La descomposición del mercurio no puede lograrse sin la ayuda de su hermano”. Pero el primero que estableció este principio fue **Hermes Trismegistus**, el padre de la alquimia, cuando dijo: “El dragón no morirá a menos que su hermano muera con él”. Por **dragón** da a entender el **mercurio** y por el **hermano**, el **azufre**; este último **proviene del Sol** —el cual es oro—; y el primero de la **Luna** —que es plata. Notad, además, la sabida exposición de Trismegistus: “Por esta razón, aconsejo a los hombres que, **a menos que conozcan los propósitos de los alquimistas y la terminología por ellos empleada**, no intenten adentrarse en los secretos de esta ciencia; de lo contrario son unos necios. **Este arte es ciertamente el mayor de los misterios**”.*

A continuación Chaucer transfiere a sus lectores lo que según él se encontraba en una obra que atribuye a Platón, con toda seguridad apócrifa, pero que interesa transcribir aquí porque nos muestra lo que el poeta inglés creía verdadero:

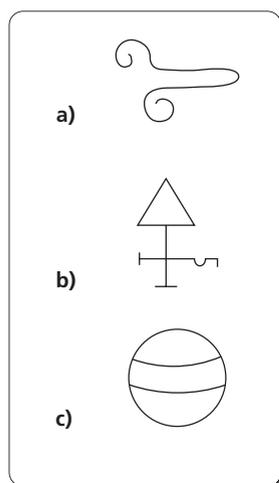
*Hubo también el caso de aquél discípulo de Platón... que preguntó al maestro:*

*—Os ruego me digáis el nombre de la piedra filosofal.*

*—Es una piedra que la gente llama **Titán**.*

*—Y eso, ¿qué significa?*

*—Lo mismo que **Magnesia**. Digamos que es un líquido compuesto de los cuatro elementos.*



**Figura 2.4**  
Símbolos alquímicos de algunos elementos. **a)** mercurio, **b)** azufre, **c)** sal.

—*Mi querido maestro, os suplico me reveléis los principios básicos de este líquido.*

—*De ninguna manera* —replicó Platón. *Todos los alquimistas se obligaron bajo juramento a no revelar a nadie el secreto, ni aun guardarlo escrito en un papel. Tan celoso está Cristo del Secreto, que no quiere que sea conocido, excepto cuando a Él le place y entonces lo comunica a los hombres que Él juzga conveniente; a los demás, lo mantiene oculto. Esto es todo.*

Y termina Chaucer:

*Ya que Dios prohíbe a los alquimistas descubrir el secreto, lo mejor que podemos hacer es olvidarnos de la piedra filosofal. Jamás prospera el que se enfrenta con Dios, aunque esté metido en la alquimia hasta el fin de sus días.*

Lo que acabamos de transcribir, que se encuentra al final del cuento ya mencionado, nos remite a lo que Chaucer consideraba la verdadera alquimia, “arte” según creía él, transmitido por Dios a unos cuantos *elegidos* que asumían la obligación de mantenerlo en secreto.

Eso es exactamente lo que el hombre de la Edad Media creía que era la alquimia, lo que a su vez implicaba creer:

- Que su conocimiento procedía de la divinidad.
- Que ese conocimiento lo poseían sólo algunas personas, como el mencionado Arnaldo de Vilanova, elegido por aquella y, por tanto, era locura pretender tener acceso a él sin *ser un elegido, un iniciado*.
- Que a ese conocimiento lo acompañaba una terminología específica, un lenguaje simbólico inaccesible a la persona común y corriente.

La alquimia fue una *filosofía oculta* asociada a la magia, desarrollada mientras ésta fue considerada como un hecho natural, como una potencia de la naturaleza, en aquellos siglos del medioevo y el Renacimiento durante los cuales todos los humanos, desde los más pobres e ignorantes hasta los más cultos y ricos, asumían que la creación del mundo había sido un extraordinario acto de magia del máximo mago, o demiurgo, que podía concebirse: Dios.

## No todo lo que reluce es oro ni todos los que se decían alquimistas lo eran

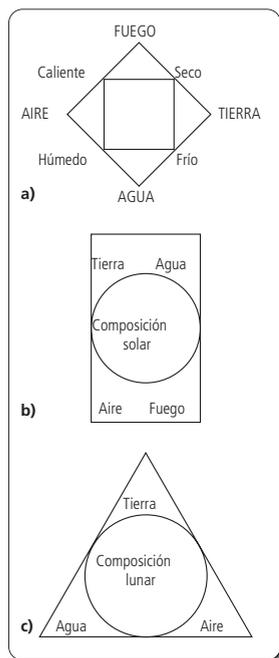
El diálogo transcrito anteriormente, que Geoffrey Chaucer atribuye a Platón, no puede ser de él, es apócrifo como ya dijimos. La prueba de su falso origen es simple: Platón no pudo referirse a *los alquimistas* porque esta palabra, alquimia, es de origen árabe y surge en los siglos VI y VII, aproximadamente, 1200 años después de la muerte del filósofo ateniense.

Platón tampoco pudo hacer ninguna referencia a *Cristo*, quien apareció en la historia 500 años después de la muerte de aquél.

Pero el texto nos refleja algunas ideas importantes para entender qué fue la alquimia. En primer lugar observamos que Chaucer, en la parte final del cuento, nos remite *a lo que de la alquimia opinaban los “auténticos” alquimistas*. Si este autor habla de los “auténticos” es porque pensaba que había alquimistas *no auténticos* y de ahí la necesidad de separar o clasificar, distinguiendo entre unos y otros.

El hecho de que la mayoría de los que entonces se decían alquimistas no lo fueran *auténticamente* produjo que la imagen de la alquimia transmitida a nuestra época, fuera una imagen falsa, desvirtuada, deforme y *no auténtica*.

En efecto, lo que en los textos modernos de química se dice de los alquimistas se re-



**Figura 2.5**

Los cuatro elementos aristotélicos fueron recogidos en la época de la alquimia mediante figuras geométricas. **a)** Figura de la obra *Calvis Sapientiae*, atribuida a Alfonso X de Castilla. Las otras dos figuras son de la obra *Practica; Th. Ch.* **b)** El oro, elemento solar, al ser perfecto se compone de una proporción igual de los cuatro elementos, **c)** la plata, que es la luna, no contiene el elemento fuego.

fiere por desgracia sólo a los *falsos alquimistas*, a los embaucadores y timadores que eran los que estaban en contacto, tanto con la burguesía medieval y renacentista, como con la gente del pueblo. Los otros, *los auténticos*, se aislaban de los demás para practicar su trabajo, un trabajo esencial y solitario de búsqueda de respuestas a sus angustias existenciales.

Lo primero que hay que entender de la alquimia, esa sí, *la auténtica*, y de los *verdaderos* alquimistas, es que no se trataba de una *profesión*, sino de una *actividad privada* realizada por personajes reconocidos públicamente por lo que hacían en ámbitos muy diferentes: un obispo, un papa, un abad, un médico famoso, un maestro de reconocido prestigio, un artista plástico, un metalurgista destacado, forman parte de la larga lista de personajes atraídos por la alquimia y los problemas filosóficos que planteaban en su marco teórico.

¿Cuáles eran estos problemas? ¿Cuál su origen? ¿Por qué se buscaban respuestas en el trabajo oculto del laboratorio? ¿De qué naturaleza fueron los frutos de esta búsqueda? ¿Por qué aunque muchas operaciones y procesos que desarrollaron los alquimistas son vistos hoy en los laboratorios y plantas industriales, es un error ver en el alquimista a un precursor del químico moderno? ¿Qué ideas de los alquimistas perduraron como tesis de los investigadores hasta el siglo XIX? ¿Qué conceptos básicos de la alquimia pudieran ser compartidos por los astrofísicos y universitarios de inicios del XXI?

## Las corrientes de pensamiento que llevaron a la alquimia

Muchos y muy importantes descubrimientos fueron hechos durante el Neolítico, etapa prehistórica que fue causa y fuente de todas las mitologías y antecedente de todas las religiones. La cerámica, la agricultura y la herbolaria, la extracción y utilización de pigmentos tanto en telas como en paredes, la fusión de minerales, extracción de los metales y elaboración de vasijas, cinturones y aplicaciones metálicas en la ropa, la elaboración de telas y su pigmentación, de armas y corazas de bronce, la producción de cerveza y vino, la utilización intensa de la madera y el barro resecado o cocido para levantar construcciones, la construcción de embarcaciones, son todas empresas del Neolítico —impensables, por cierto, sin el dominio del fuego.

Es en este momento de la historia cuando surgen las primeras poblaciones sedentarias que dominan ya los ciclos de siembra y cosecha y que coexisten con grupos de nómadas, cazadores y recolectores, presentes aún en estos albores del siglo XXI, que es cuando surgen los primeros nombres relacionados con los metales.

“En el principio era el Verbo”, dice el evangelio de San Juan; “y el Verbo era con Dios, y el Verbo era Dios”, declaración que nos ubica en un hecho esencial: la palabra; el lenguaje, nos precede, *está ahí antes de que llegemos a este mundo*.

Efectivamente, antes de nacer nuestros padres ya han decidido cual va a ser nuestro nombre y con él, mucho antes de aprender a hablar, estamos registrados, mediante el acta de nacimiento, en la sociedad de la que formamos parte. A través de la palabra, de los nombres, nos apropiamos de todos los elementos de la realidad que nos envuelve y de la que formamos parte, siendo así, a través del enriquecimiento de nuestro lenguaje, como añadimos a nuestra naturaleza biológica la que nos hace *humanos*, y nos diferenciamos de los demás animales.

“El hombre no *nace*; el hombre se *hace*”, y esto es fundamentalmente cierto gracias al lenguaje. Nuestra animalidad o nuestra humanidad se relacionan irremediabilmente con el enriquecimiento o pobreza de la estructura del lenguaje que conforma nuestro pensamiento y de la que nosotros mismos formamos parte. Es en esta función humanizadora del lenguaje que cobra importancia el hecho de haber dado nombre a los meteoritos en plena etapa del Neolítico.

Y es esta función del lenguaje, la que nos explica por qué para los alquimistas y los



**Figura 2.6**  
Meteorito.

magos la palabra es esencial como medio para convocar y dirigir las fuerzas de la naturaleza. La caída de un meteorito tuvo que llenar de pavor a los hombres del Neolítico. *Llegaba del cielo y llegaba encendido. ¿Qué hay de raro en que el primer nombre registrado de un meteorito halla sido el sumerio An-bar, cuyos signos pictográficos corresponden a “cielo” y “fuego”?*

*Venía del cielo y llegaba encendido. “Metal celeste” o “metal estrella” son los primeros nombres del hierro, del hierro meteorítico, muy probablemente el primer metal con el que tuvo contacto el hombre.*

En la búsqueda de piedras con las que elaborar los muchos artículos que definieron la Edad de Piedra, el hombre tropezó con piedras de colores, hoy diríamos *minerales*, que llamaron su atención y de la mano del descubrimiento de que al calentar las piezas elaboradas, ollas, platos, vasijas, se las hacía más resistentes, se llegó al calentamiento dentro de un espacio cerrado para evitar el enfriamiento provocado por el contacto con el aire.

Así crearon los *hornos* del alfarero, los que muy probablemente llevaron al descubrimiento de los metales contenidos en los minerales, que separados de estos fluían de ese horno.

El hombre dio un gran paso al relacionar los minerales con los metales extraídos. Al elaborar con ellos nuevos y más variados artículos de uso cotidiano y comercializarlos intensamente, se vivió una profunda revolución social, cultural, económica y política.

Para aquellos hombres los metales eran parte de una naturaleza a la vez mágica y divina, toda ella dotada *de vida*. *¿Por qué extrañarnos hoy, de las asociaciones hechas entonces entre materia, vida y divinidad?*

Hoy sabemos que el oro, de color amarillo, es el más estable de los metales conocidos. Esa estabilidad, resistencia a la corrosión y su especial color, fueron cualidades rápidamente asociadas al Sol, una de las primera divinidades, y lo más importante, en diversas culturas. La eternidad divina parecía tener su mejor modelo en el oro. Como en otras, en el ámbito del Mediterráneo, el culto a la deidad solar fue equilibrado con el correspondiente culto a la deidad terrestre, ambas, como todo lo vivo, *dotadas de sexualidad*.

A las observaciones de los fenómenos naturales, impregnadas de terror de los hombres del Paleolítico y el Neolítico, se sumaron las correlaciones encontradas entre ellos: al relámpago y al ruido del trueno le seguía la lluvia o la tormenta; de la tierra humedecida surgían las plantas y los hongos, a la par que cambiaba su color pardo a verde y surgían primero las hojas, después las flores y finalmente los frutos.

La ingestión, primero por curiosidad y después voluntaria, de los hongos, se vio acompañada del inevitable encuentro con los efectos alucinantes de algunos de ellos *¿Qué otra cosa podían pensar sino que el carácter divino del rayo y del trueno se había trasladado con la lluvia a la tierra y que la persona que ingería los hongos alucinógenos era poseída por la divinidad? ¿Y cómo sorprendernos de que a partir de esa experiencia surgiera la búsqueda voluntaria de la unión con esa divinidad a través de la ingestión de hongos? Así, a partir del descubrimiento azaroso de algunos efectos y de su interpretación surgió el rito mágico-religioso.*

El rayo y el trueno fueron identificados como manifestaciones de dioses masculinos que a través de la lluvia fecundaban a la Tierra, madre de todos los animales y vegetales.

De manera semejante, el meteorito fue identificado como producto de una deidad masculina que con su concurso fecundaba a la madre Tierra.

Al descubrir diferentes metales, los famosos siete metales de la Antigüedad: oro, mercurio, plomo, plata, cobre, hierro y estaño; se creyó que en el seno de la tierra sufrían una transformación natural, en una especie de lo que hoy llamaríamos proceso embrionario, cuyo producto final, acabado y perfecto *era el oro*.

Desde las primeras culturas históricas de la cuenca mediterránea y Asia Menor, los mineros creían que al extraer un mineral para obtener más tarde un metal, interrumpían un ciclo natural y sagrado lo que implicaba asumir una gran responsabilidad ante la divinidad que les había permitido descubrir cómo hacerlo. Por eso el trabajo de los mineros y



**Figura 2.7**  
La estrella alquímica de las siete puntas.

**Figura 2.8**

Representación alegórica del plomo, mediante un hombre lento y tullido, debido a la densidad del metal.

**Figura 2.9**  
"Ourobours".**Figura 2.10**  
Papiros egipcios.

de los metalurgistas fue acompañado de ritos y conjuros con los que se quería atraer la benevolencia de los dioses o las potencias naturales derivadas hacia el resultado perfecto.

Desde la Antigüedad hasta el Renacimiento, la innovación mágica fue el medio secreto en el que los iniciados creían para lograr el concurso de la divinidad en el buen logro de sus propósitos. Léase al respecto el relato que hace Benvenuto Cellini en su autobiografía de los procesos de fusión y vertido del bronce para llegar a su "Perseo" (1536).

En esta corriente de pensamiento que arranca del Neolítico y llega a la Edad Moderna se encuentra la alquimia. Las mitologías la reflejan y la nutren, y la pugna entre religiones politeístas y monoteístas es más superficial de lo que parece. Finalmente, en todas se da la figura de un dios creador y único, unidad de la que se deriva la diversidad. De lo que es *único* y *primigenio* se deriva todo lo demás, *diverso*, otros dioses o semidioses, ángeles y demonios, seres y cosas. Al morir, lo diverso regresa a formar parte de la unidad original, del UNO.

En términos de energía y masa, los científicos actuales, con distinto fundamento, estarían de acuerdo con este planteamiento, aún cuando añadieran, como desenlace final, las consecuencias del Tercer Principio de la Termodinámica.

Los alquimistas lo expresaron con su principio "Todo es Uno, Uno es Todo", y lo representaron con un símbolo: una serpiente mordeándose la cola, símbolo de que el final y derivado se une al principio y fuente, vuelve a él, símbolo al que llamaron "Ourobours".

Las culturas mediterráneas se influyeron mutuamente. Las más antiguas, sumeria, arcadia, fenicia, babilonia y egipcia, se relacionaron e intercambiaron influencias en Asia Menor. Egipto estuvo en contacto con Creta y Fenicia, y sus habitantes comerciaron y fundaron colonias en Grecia, Italia y la Península Ibérica.

La cultura griega se nutre de las otras culturas mediterráneas que la precedieron, y en su momento Grecia y el resto de lo que hoy es Europa estuvieron a un paso de ser sometidas y absorbidas por la cultura persa, conquistadora de Egipto y heredera de Babilonia, Asiria y Malta. El reflejo de las invasiones, primero de los griegos, que con Alejandro Magno llegan hasta la India, y después de los romanos que con Trojano dominan la mayor extensión de tierras y mares lograda hasta entonces en toda la historia, permite que las influencias fluyan ahora de Europa hacia el interior de Asia.

Este flujo y reflujo provoca el ir y venir de influencias religiosas, de costumbres, de hábitos, de artes y oficios, de productos de consumo, de creencias y aficiones y, finalmente de concepciones del mundo, de cosmovisiones y fundación de centros urbanos, pueblos y ciudades.

Alejandro Magno fundó más de 30 centros de población a los que llamó Alejandría.

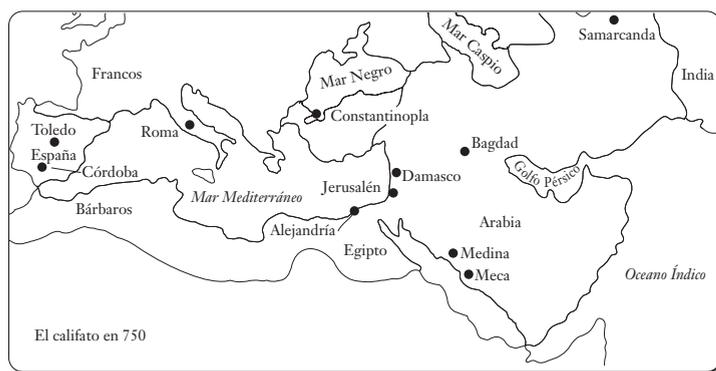
Una de ellas destacó tanto por su cultura y desarrollo urbano que en el presente es la única que se recuerda. Esta Alejandría fue la capital de Egipto cuando Cleopatra era su reina; en ella se había construido una de las maravillas del mundo antiguo, el famoso faro que guiaba a los navegantes hacia la seguridad de su puerto y en ella se encontraba la biblioteca-universidad más famosa de su tiempo, destruida y quemada por las tropas de Julio César al conquistar Egipto, en el siglo I a. de n.e.

Allí, en Alejandría, ciudad cosmopolita, nació la alquimia en el siglo I de n.e. y se desarrolló hasta el siglo VI.

## El nacimiento de la alquimia

Las influencias que le dieron origen se relacionan con su ubicación geográfica.

En primer lugar mencionamos esa corriente muy antigua de pensamiento místico originada en Asia Menor, Babilonia y Persia transportada a los pueblos mediterráneos, según la cual todo lo material vive y transporta la presencia de la divinidad, vive y se transforma, tratando, si es el ser humano el que lo intenta, de volver a ella e incorporársele después al morir. En ella se incorporan los estudios astrológicos de los babilonios y su



**Figura 2.11**  
El califato árabe alrededor del año 750.

bronze al que consideraron “otra clase de cobre”; la religión egipcia y el momento tan importante en que Amenofis IV decidió cambiar su nombre por el de Akenatón para impulsar la creencia en un solo dios, el Sol, para todos los mortales, constituyen otra fuente de influencias que llevaron la alquimia a Alejandría.

Finalmente, la cosmovisión y reflexiones del mundo griego, reflejo de ideas mestizas de occidente a oriente, impulsadas por Alejandro Magno, refundidas en Alejandría con el pensamiento babilónico, persa y egipcio, constituye la tercera corriente de influencias que reconocemos en la alquimia.

Estas corrientes de pensamiento, creencias, fe y experiencias secretas sujetas a la magia de los conjuros, para alcanzar los resultados deseados en la transformación de la materia, se reúnen en Alejandría en el siglo I de n.e. y constituyen el marco teórico y la justificación del grupo de personas que deciden dedicarse a la búsqueda del, para ellas, secreto natural de perfeccionamiento de la materia.

Hacia el siglo III de n.e., los alejandrinos han creado, sintetizando todas sus influencias, un extenso y complejo marco teórico, acreditado por ellos a un misterioso personaje al que llaman *Hermes Trismegisto*, *Hermes tres veces grande*, que no es el dios griego *Hermes*, ni mucho menos su equivalente romano *Mercurio*. Se trata del *Hermes* introducido en Egipto durante la ocupación persa, quienes llevan la figura del mago a ese país, pero del mago como intermediario de los dioses, del mago-sacerdote.

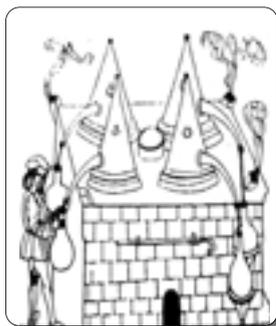
Pero no sólo han desarrollado un consistente y muy internacionalizado marco teórico; también han desarrollado técnicas y aparatos en sus estudios de interacción con los cambios de la materia. Convencidos de que las cosas y los seres son el producto de la unión variable de las cuatro sustancias fundamentales, llamadas *elementos* por Cicerón en el siglo I. a de n.e., y convencidos de que un elemento debe *morir*, perder su forma, para poder *renacer* con otra forma, como otro de los elementos, estos seguidores de las teorías de *Hermes Trismegisto*, se aislaron del público para allá, en esos lugares dotados de su equipo, libros, figuras, símbolos y animales simbólicos, proceder a sus estudios y búsquedas.

En uno de los textos atribuidos a ese personaje con cualidades del *Hermes* egipcio, de *Toth* y *Anubis*, al que llamaron *Trismegisto*, aparece al término *xerión* para referirse al secreto natural buscado, que implicaba a la par que un camino de perfeccionamiento, la garantía de la vida eterna, en forma de eterna juventud.

En este término, *xerión*, se encuentran reunidas por tanto las cualidades de la que después se llamaría *piedra filosofal*, y lo que se llamaría *elixir de la juventud*. Para los alquimistas medievales no eran dos secretos distintos, uno implicaba al otro. Son los escritos posteriores al siglo XVIII, los que trasladan este error a los pocos textos de química



**Figura 2.12**  
Laboratorio alquimista.



**Figura 2.13**  
Figura medieval del horno de una destilería.

modernos en los que, en media página, se presenta a los alquimistas como los precursores, frecuentemente embaucadores, de los químicos de hoy.

Los seguidores de Hermes, sólo unos cuantos entre los alejandrinos, realizaban experimentos que hoy conocemos. La interacción con la materia cuando se ignoran sus propiedades implica un riesgo de accidente que puede variar de lo inofensivo a lo mortal.

Esto lo percibieron aquellos buscadores de la perfección para lograr su propio y personal retorno al Gran Todo. Y decidieron por una parte no comunicar públicamente sus descubrimientos y, por otra, *usar un lenguaje simbólico al escribirlos*.

Este carácter secreto del trabajo de aquellos *herméticos*, o seguidores de Hermes, llevó a extender el nombre de *hermético* a todo lo que tiene esa característica, trátese de grupos humanos, de conocimientos o de documentación.

A pesar de sus esfuerzos, el trabajo de los seguidores de Hermes y sus continuadores, los alquimistas, trascendió, aunque de lejos, a sus contemporáneos quienes tomaron al pie de la letra lo que era simbólico y, desde su ignorancia, pensaron que los alquimistas buscaban efectivamente llegar al oro y la plata a partir de metales más baratos, transformando así la realidad en mito, transmitido como tal hasta nuestros días.

Nicolás Flamel, alquimista francés del siglo XIV, nunca enterró la piedra filosofal al pie de una columna de la Catedral de Notre Dame, porque dicha piedra nunca fue un objeto físico, sí fue en cambio, como hemos dicho, un supuesto camino de perfección humana, de conducta y ética personales, cuyo descubrimiento, si se dio, fue un logro también personal de aquellos a quienes la tradición y el mito se los atribuyeron.

Ciertamente la química moderna le debe a la alquimia el descubrimiento y los nombres de la mayor parte de los procesos de laboratorio, así como sus principales procesos y aparatos que también podemos identificar en el equipo y aparatos de las plantas industriales. Pero los marcos teóricos y el trasfondo de ideas que los fundamentan son radicalmente diferentes, como lo son los objetivos y las fuentes de inspiración de sus acciones.

## De herméticos a alquimistas y químicos

El ascenso del cristianismo fue áspero y sufrió de la formación de muchas y diversas interpretaciones del mensaje de Cristo y del Antiguo Testamento. Surgieron diferentes grupos, en ocasiones muy agresivos e intolerantes con todos los que no pensaban como ellos, y esta situación se resolvió sólo cuando el emperador romano Constantino decidió apoyar a uno de esos grupos declarándose su aliado político. Así nació la Iglesia católica, apostólica y romana en el Concilio de Nicea, año 325 de n.e.

Entre los disidentes destacan personajes como Arrio y Néstor, cabezas de los grupos llamados *arrianos* y *nestorianos*. Unos y otros tuvieron que desplazarse hacia los extremos del Imperio, teniendo gran éxito Arrio entre las tribus germánicas que invadieron en oleadas sucesivas la parte occidental del Imperio Romano hasta destruirlo, y ubicándose los nestorianos en lo que hoy es Siria, antigua Asiria.

Los nestorianos, muchos de ellos habitantes de ciudades como Alejandría, llevaban con ellos un tesoro: la tradición cultural de la antigüedad de la zona mediterránea.

Cuando los árabes, después de asumir la nueva religión predicada por Mahoma, asumen también extenderla por todo el mundo conocido dirigidos por los primeros jalifas, sus discípulos y en ocasiones parientes, se inicia la expansión del Islam.

Muy pronto llegan a Siria y allí tropiezan con los nestorianos que hablan el siríaco, idioma afín al árabe. Del siríaco al árabe, los conocimientos de la antigüedad y sus problemas filosóficos pasan fácilmente a los conquistadores que los absorben con avidez.



**Figura 2.14**  
La primera representación conocida de una balanza rodeada de un marco de vidrio.

Cuando llegan a Alejandría ya saben de las tesis y búsquedas de los seguidores de Hermes; saben que su arte se relaciona con la palabra *chemia*, ciencia del misterio de los sacerdotes egipcios y probablemente antiguo nombre de Egipto, pues *chemia* es el nombre de los lodos del Nilo.

Los árabes utilizan su prefijo “al”, equivalente a “El” o “La” asociándolo al de *Chemia* y nace así el nombre árabe *Al-Quimia* con el que se designa el conjunto de conocimientos y acciones de los herméticos alejandrinos, que a partir de entonces serán llamados *alquimistas*.

Los árabes llevan la alquimia a Europa, a través de España y Sicilia, y desde ahí se traslada siempre como búsqueda oculta de unos cuantos al resto de Europa, donde se cultiva durante toda la Edad Media, el Renacimiento y parte del siglo XVII. De España llega a México en el siglo XVI, inspirando el trabajo de personajes tan reconocidos como Bartolomé de Medina.

Algunas tesis alquimistas resultan muy persistentes. La tesis del *flogisto* considerada por Emanuel Kant como la tesis del siglo (XVIII), tiene origen alquimista, considera que existía un “principio de la combustión”, al que *llamaba azufre*. George Sthall, entre 1697 y 1718, propuso una tesis semejante cambiando el término “azufre” por “flogisto”. Esta tesis perdura hasta finales del siglo XVIII, siendo superada a partir de los estudios de Lavoisier. Por otra parte, la división de la química en orgánica e inorgánica, apoyada por Berzelius en el siglo XIX, también es derivada de concepciones alquimistas. La idea del “soplo vital” que transmitía vida a todos los animales y plantas, haciendo de sus componentes unos componentes “especiales”, era una tesis de la alquimia.

La alquimia resultó fecunda en los aspectos mencionados, pero a medida que la teoría atómico-molecular de la estructura de la materia se fue imponiendo, a lo largo del siglo XIX, y en la medida que el angustioso “Dios no habla” de Pascal se impuso como tesis inspiradora de otro estilo de estudio de los fenómenos naturales, las tesis alquimistas y sus derivadas tesis teológicas fueron quedando atrás, para quedar incorporadas en el mito y la leyenda.

## LA MATERIA SE TRANSFORMA: ELEMENTOS

A reserva de que en el capítulo 5 y los posteriores se haga una exploración más sistemática del cambio químico, nuestra experiencia cotidiana con la materia nos da la idea permanente de cambio o transformación. Por ejemplo, la materia cambia cuando:

- el agua líquida se evapora;
- un cerillo se enciende;
- una planta florece.

El primer cambio es de estado de agregación. Como se analizó en el capítulo 1, no se trata de uno de naturaleza muy radical, pues el vapor puede condensarse sobre una pared fría y obtener agua líquida de nuevo en pequeñas gotas de rocío.

La segunda transformación es más drástica, se trata de un cambio químico ciertamente irreversible. No concebimos que pueda darse la reacción inversa, que los gases de la combustión puedan formar el cerillo original.

El tercero es un cambio biológico, producto a su vez de decenas o cientos de transformaciones químicas profundas en una planta.

## Elementos químicos

Entre todas las transformaciones químicas posibles hay unas que resultan de mucho interés: las que dan lugar a los elementos. Es decir, transformaciones que conducen a sustancias que ya no parecen estar constituidas por otras más simples, de aquí que se las llame **sustancias elementales o elementos**.

Un **elemento químico** es aquella sustancia que no puede descomponerse en otras más simples mediante algún proceso químico común.<sup>1</sup>

Los elementos, si bien no pueden descomponerse, pueden reaccionar entre sí para formar compuestos.

Un **compuesto** es una sustancia constituida por dos o más elementos químicos.

El hidrógeno y el oxígeno son elementos, porque por más que lo intentemos no pueden separarse químicamente en sustancias más simples. Entre tanto, el agua es un compuesto, porque su separación en hidrógeno y oxígeno se logra cuando se hace pasar una corriente eléctrica a través de ella (ver DESCÚBRELO TÚ: Los componentes del agua).

Todas las sustancias compuestas contienen dos o más elementos. El agua está formada por hidrógeno y oxígeno. La sacarosa o azúcar de mesa por carbono, hidrógeno y oxígeno. El bicarbonato de sodio que se utiliza en el polvo para hornear contiene sodio, hidrógeno, carbono y oxígeno. Al descomponer estos tres compuestos es posible obtener sus elementos constituyentes.

Cada elemento y cada compuesto tienen propiedades únicas que permiten clasificarlos e identificarlos. Además, las propiedades físicas y químicas de un compuesto son distintas a las de los elementos que los forman. El agua, un compuesto líquido a temperatura ambiente que es incoloro e insaboro, es distinta al hidrógeno y al oxígeno, los dos gases incoloros que la constituyen.

### DESCÚBRELO TÚ: Los componentes del agua



**Figura 2.15**  
Aparato de Hoffman.

¿Por qué la fórmula del agua es  $H_2O$ ?

#### Material

- Aparato de Hoffman (ver figura 2.15)
- 2 electrodos de platino o nicromel (normalmente incluidos en el aparato)
- 1 pila de 9V
- Sulfato de sodio
- Agua

#### Procedimiento

Agrega 2 g de sulfato de sodio y unas gotas de indicador al volumen de agua que se va a descomponer.

Arma el aparato de Hoffman como te indique tu profesor y conecta los electrodos a la pila.

Mide el volumen de cada uno de los gases que se generan.

Identifica cada uno de ellos introduciéndoles una pajilla encendida.

¿Qué relación existe entre el volumen de hidrógeno y el volumen de oxígeno generados?

¿Podrías asegurar entonces que la fórmula del agua es  $H_2O$ ?

<sup>1</sup> Aquí la palabra “común” indica que no se consideran reacciones como el decaimiento radioactivo (y otras reacciones nucleares), las que veremos en capítulos posteriores de este texto.

**Tabla 2.1**

Tabla de elementos químicos de Antoine L. Lavoisier.

<b>TABLA DE LAS SUSTANCIAS SIMPLES*</b>		
	<b>Nombres nuevos</b>	<b>Nombres antiguos a que corresponden</b>
Sustancias simples que pertenecen a los tres reinos, y que pueden mirarse como elementos de los cuerpos	luz	luz
	calórico	calor
		principio del calor fluido ígneo fuego materia del fuego y del calor
	oxígeno	aire deflostaticado
		aire empireal
aire vital		
Base del aire vital		
azoeto	gas flogisticado	
	mofeta base de la mofeta	
hidrógeno	gas inflamable base del gas inflamable	
Sustancias simples no metálicas oxidables y acidificables	azufre	azufre
	fósforo	fósforo
	carbón	carbón puro
	radical muriático	desconocido
	radical fluórico	desconocido
	radical borácico	desconocido
Sustancias simples metálicas oxidables y acidificables	antimonio	antimonio
	plata	plata
	arsénico	arsénico
	bismuto	bismuto
	cobalto	cobalto
	cobre	cobre
	estaño	estaño
	hierro	hierro
	alabandina	alabandina
	mercurio	mercurio
	molibdeno	molibdeno
	nikel	nikel
	oro	oro
	platina	platina
	plomo	plomo
vólfran	vólfran	
zink	zink	
Sustancias simples terreas salificables	cal	tierra calcárea, cal
	magnesia	magnesia, base de la sal de Epsom
	barita	barita, tierra pesada
	alúmina	arcilla, tierra del alumbre, base del alumbre
	sílica	tierra silícea, tierra vitrificable

 \*Tomada de Antoine Laurent Lavoisier, *Tratado elemental de química*, ed. facsímilar, UAM-Xochimilco, 1990.

**Figura 2.16**

El aluminio es el metal predilecto en la era moderna. Más de 11 millones de toneladas al año se utilizan para construir desde una lata de cerveza hasta un avión.

Algunos de los elementos se conocen desde los principios de la historia, debido a que se presentan en la naturaleza en forma libre y no como parte de compuestos. A este grupo pertenecen el oro, la plata, el cobre, el plomo y el azufre. Antoine L. Lavoisier fue el primero en hacer una lista de elementos químicos (ver tabla 2.1 de la página anterior), a los que llamó “sustancias simples”. En virtud de que aún no se habían logrado descomponer, se sabe hoy que muchos de los supuestos elementos citados en realidad no lo son, sino que son compuestos (como la cal o la magnesia, por ejemplo). Otros no son ni lo uno ni lo otro (como la luz y el calórico).

Con el advenimiento de nuevas técnicas eléctricas (descubrimiento de la pila voltaica a comienzos del siglo XIX) se aislaron, entre otros elementos, el potasio y el sodio. En 1825 se descubre el aluminio (del alumbre), el tercer elemento más abundante y el metal más común de la Tierra.

Así, a finales del siglo XIX el número de sustancias elementales reconocidas había aumentado a 63 y a comienzos del siglo XX eran ya 82. El descubrimiento del renio (Re) en 1925 completó la lista de los 88 elementos naturales que pueden encontrarse en la Tierra.

Todo el mundo, desde una manzana hasta una televisión, procede de estas 88 variedades básicas de la materia. Esto quiere decir que absolutamente todo lo que te rodea está formado por la combinación de esos 88 elementos.

En la actualidad se conocen más de 110 elementos químicos. Los adicionales a los 88 naturales han sido obtenidos por los científicos de manera artificial, a través de reacciones nucleares.

Berzelius, introduce hacia 1820 los símbolos de los elementos que conocemos hoy. Se trata de una o dos letras (la primera siempre mayúscula) que se derivan en ocasiones de sus nombres en griego, latín o de la propia lengua del descubridor.

Los símbolos químicos son un tipo de alfabeto científico. Al igual que las letras del alfabeto se utilizan para construir palabras, en este caso las fórmulas químicas representan ya sea a elementos o a compuestos.

**Figura 2.17**

No es fácil imaginárselo, pero el timbre del teléfono está formado por una colección de 42 elementos, donde se incluyen algunos exóticos como el vanadio (V), el paladio (Pd), el berilio (Be), el indio (In) y el molibdeno (Mo). Tampoco es fácil darse cuenta que en un día común utilizas compuestos de selenio (Se) que se encuentran en el champú, o de circonio (Zr) en el desodorante, o de flúor (F) en la pasta de dientes, o de yodo (I) en algunos desinfectantes. Todos éstos son elementos químicos.

**HERRAMIENTA:****Los símbolos de los elementos**

Es importante recordar o aprender los símbolos elementales más comúnmente utilizados en este libro, que son los siguientes:

Elemento	Símbolo	Elemento	Símbolo	Elemento	Símbolo
azufre	S	aluminio	Al	bromo	Br
carbono	C	calcio	Ca	cloro	Cl
fósforo	P	magnesio	Mg	flúor	F
hidrógeno	H	mercurio	Hg	plata	Ag
nitrógeno	N	silicio	Si	plomo	Pb

## DESCÚBRELO TÚ: ¿Elemento o compuesto?

El azúcar de mesa, ¿es un elemento o un compuesto?

### Material

- 2 g de azúcar
- Tubo de ensayo
- Pinza para tubo de ensayo
- Mechero

### Procedimiento

Coloca el azúcar en un tubo de ensayo. Toma el tubo con las pinzas y caliéntalo con un mechero hasta que dejes de observar algún cambio. Anota todas tus observaciones. ¿Qué elementos reconoces? ¿Se desprende algún gas? Si es así, ¿de qué gas crees que se trata?

Entonces, el azúcar, ¿es un elemento o un compuesto?



## QUÍMICA IBEROAMERICANA:<sup>2</sup> Elementos descubiertos y producidos

En el siglo XVIII se conocían 31 elementos químicos. En 1782 un español, don Fausto de Elhúyar descubrió en el País Vasco, antes de trasladarse a la Nueva España a dirigir el Real Seminario de Minería, el elemento químico hoy llamado tungsteno, al que denominó wolframio. Por ello su símbolo es W.

Pero, de todos los elementos, ¿cuántos más se han descubierto en Iberoamérica?

La primera aportación local a la tabla de los elementos fue el platino, conocido por los indígenas sudamericanos y presentado al mundo científico en 1748. Salvo esta contribución prehispánica, el vanadio fue el primer elemento revelado en América. Fue descubierto en 1801, como resultado del estudio de un mineral de

Zimapán, Hidalgo, por Andrés Manuel del Río, español afincado en México. Lo llamó eritronio pero en Europa lo convencieron de que lo había confundido con el cromo, lo que en realidad resultó falso.

Este elemento fue vuelto a descubrir en 1830 por el sueco Nils Gabriel Sefstrom y bautizado por él como vanadio, con símbolo V, en honor a Vanadis, diosa escandinava de la juventud y la belleza.

Hoy la producción de elementos, en Latinoamérica es una industria importante. En la tabla 2.2 vemos algunos ejemplos. Esperamos que no tengas dudas de los nombres a los que se refiere cada símbolo, si no es el caso, consulta el Apéndice 2.



**Figura 2.18**

Andrés Manuel del Río (1765-1849). Naturalista y químico nacido en Madrid, España, y muerto en México. Se trasladó a este país en 1794, al ser creado en 1792 el Real Seminario de Minería, adonde llegó con Fausto de Elhúyar, descubridor del wolframio o tungsteno, Francisco Antonio Bataller, Luis Linder y Federico Sonneschmidt. En 1801, en un mineral de Zimapán, Hidalgo, extrajo un nuevo elemento al que llamó eritronio y el que posteriormente recibió el nombre de vanadio. Daba sus clases con el libro de *Química* de Lavoisier, primero traducido al español en México que en España. Fue autor del libro *Elementos de oritognosia*. Fue nombrado en 1820 diputado a Cortes y defendió la independencia de México. Se quedó en este país al formarse como una nueva nación y continuó laborando como químico hasta su muerte.

<sup>2</sup> Esta sección recoge hechos y aportaciones a la química realizados en Iberoamérica.



## Análisis químico elemental

Un compuesto determinado está formado por los mismos elementos, y éstos siempre están presentes en las mismas proporciones en peso,<sup>3</sup> lo que se conoce como la **Ley de las Proporciones Constantes**.

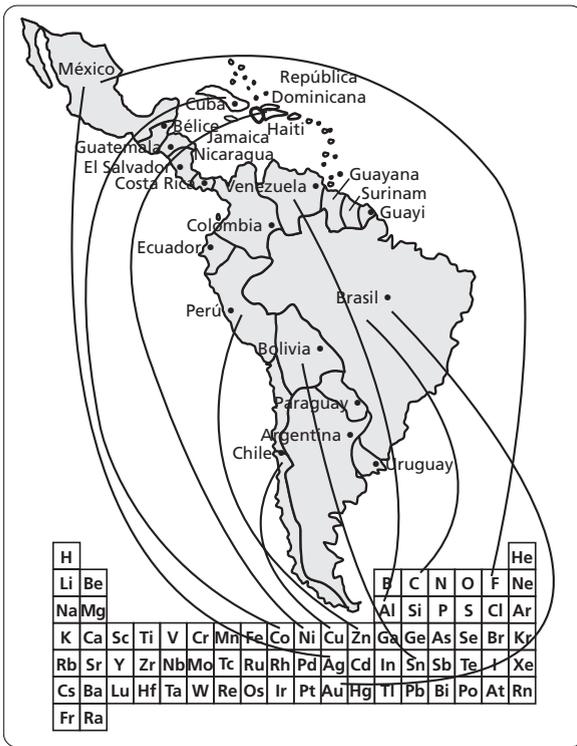
Por ejemplo, el cloruro de sodio o sal común contiene dos elementos: cerca de 40% del peso es sodio y el 60% restante es cloro. Esto es independiente de la forma en la que se obtuvo dicha sal. Si es sal, tendrá siempre esa misma proporción en peso de sodio y de cloro.

Igualmente, el agua contiene siempre ocho gramos de oxígeno por cada gramo de hidrógeno (11.1% en peso de H y 88.9% en peso de O), sin importar si se obtuvo de un río, de la lluvia o como destilado del agua de mar

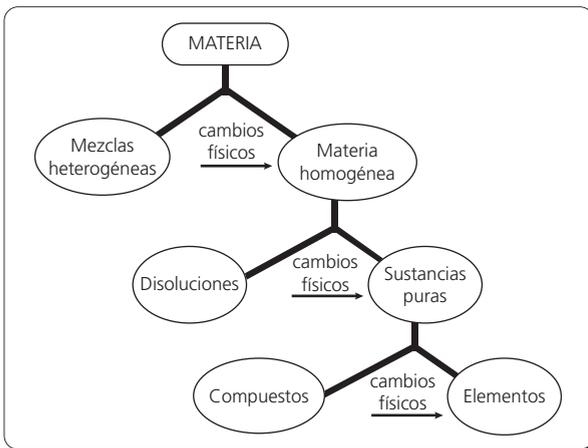
$$\%H = 1 \text{ g H} / (1 \text{ g H} + 8 \text{ g O}) \times 100 = 11.1 \% \text{ H}$$

En la figura 2.20 se resume mucho de lo que hasta ahora hemos hablado de elementos, compuestos y mezclas.

El análisis químico elemental nos permite conocer la composición de los compuestos, es decir, no sólo la presencia de ciertos elementos en ellos sino la proporción en peso de cada uno. Actualmente existen aparatos automatizados que nos informan sobre la composición elemental de una muestra cualquiera de materia.



**Figura 2.19**  
Mapa de la región latinoamericana y principales productores de elementos.



**Figura 2.20**  
Mapa conceptual de los tipos de materia.



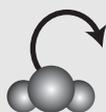
**Figura 2.21**  
El Mars Pathfinder aterrizó sobre la superficie de Marte el 4 de julio de 1997. De su interior emergió un vehículo, el Sojourner, que tomó muestras de las rocas y suelo a su alrededor. La nave llevaba el equipamiento necesario para que, desde la Tierra, conociéramos la composición elemental de las rocas marcianas.

<sup>3</sup> Conviene desde este momento hacer una precisión de los conceptos masa y peso, pues no son lo mismo.

La masa depende de la cantidad de materia y se mide en kilogramos. Mientras tanto, el peso tiene que ver con la fuerza con la que la gravedad atrae a un objeto de cierta masa y se mide en unidades de fuerza, Newton.

Un cuento basta para que veas la diferencia: Un gordito fue a ver a una bruja para solicitarle que le hiciera perder peso. La bruja le concedió su deseo, al reducir a cero la atracción gravitatoria dentro de su casa. Al llegar allí, el gordito flotaba por el techo, como un globo inflado. Sin embargo, su apariencia era la misma. Perdió peso pero no masa, que es lo que quería.

Mientras estemos sobre la superficie terrestre, la fuerza de gravedad es prácticamente constante en cualquier punto. En esas condiciones, el cociente de las masas de dos objetos es exactamente el mismo que el cociente de sus pesos. En ese caso, una masa relativa es exactamente lo mismo que un peso relativo. Podemos usar los dos términos indistintamente. A lo largo de este capítulo hemos preferido el término “peso”, para desembocar más tarde en el concepto de “peso atómico”.



TE TOCA A TI:

**Composición en peso**

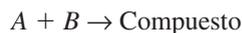
1. Cuenta el número de mujeres y de hombres que hay en tu salón. Supón que el peso de cada una de las mujeres es igual a 50 kg y el de cada uno de los hombres es de 70 kg. ¿Cuál es el porcentaje en peso de las mujeres en tu salón?
2. Dado el porcentaje en peso de las mujeres en otro salón y suponiendo los mismos pesos individuales de cada mujer y hombre del inciso anterior, ¿podrías saber cuál es la relación de hombres a mujeres en el otro salón? Deduce una fórmula matemática que te permita conocer este valor del cociente del número de hombres entre el número de mujeres en dicho salón.
3. Aplica tu ecuación para el siguiente caso: en el salón A el porcentaje en peso de mujeres es de 26.3%. ¿Cuál es el cociente del número de hombres al número de mujeres?
4. Vuelve a aplicar tu fórmula para el salón B, que tiene 58.8% en peso de mujeres.
5. ¿No te parece que podrías estar cerca de poder escribir fórmulas para la composición de hombres y mujeres en cada salón? (Nota: Algo así como  $M_2H$  o  $MH_2$ ).

Hace 200 años, ya se podían hacer análisis elementales de los compuestos para obtener su composición en porcentaje en peso. Esto se hizo con una balanza (de poca precisión) y mediante los procedimientos de análisis y síntesis químicos. Veamos cómo.

Ya sea que un compuesto se descomponga en sus elementos (A y B)



o se sintetice a partir de ellos



hay que obtener experimentalmente los pesos  $w_A$  y  $w_B$  para obtener el porcentaje en peso de cada elemento en ese compuesto. Las ecuaciones necesarias son:

$$\%A \text{ (en peso)} = \left[ \frac{w_A}{w_A + w_B} \right] \times 100$$

$$\%B \text{ (en peso)} = \left[ \frac{w_B}{w_A + w_B} \right] \times 100$$

En ocasiones resultaba difícil medir con exactitud los pesos de A y de B, dada la imprecisión de las balanzas antiguas y las múltiples fuentes de error en las determinaciones. Sin embargo, John Dalton contaba hacia 1800 con un buen número de datos bastante ciertos del porcentaje en peso de los elementos en diversos compuestos.

Por ejemplo, Dalton conoció, entre otros, los análisis del “aire fijado” (hoy dióxido de carbono) y del “aire inflamable” (hoy monóxido de carbono) realizados por Antoine L. Lavoisier a fines del siglo XVIII (ver tabla 2.3).

Los datos de la tabla 2.3 permitían saber qué gas contenía una determinada muestra de cualquiera de los dos. Para ello había que analizarla y averiguar el porcentaje en peso de sus componentes. Con todo lo difícil que pueda ser esa determinación, si el análisis mostraba 28% de oxígeno y 72% de carbono, se podía asegurar que se trataba de “aire fijado”, por ejemplo.

Tabla 2.3

Análisis de Antoine L. Lavoisier

Sustancia	% peso de carbono	% peso de oxígeno	Relación del porcentaje en peso de oxígeno y el porcentaje en peso de carbono
Dióxido de carbono (aire fijado)*	28	72	$72/28 = 2.57$
Monóxido de carbono (aire inflamable)*	44	56	$56/44 = 1.27$

\*Nombre que se les daba en aquella época.

Dalton se percató de que los cocientes de la última columna de la tabla eran aproximadamente uno el doble que el otro. Para explicarlo, lo primero que hizo fue suponer una muestra de cada gas con la misma cantidad de carbono y calcular la cantidad de oxígeno presente en ambas, mediante el uso de los porcentajes.

Supongamos que tenemos muestras de aire fijado y aire inflamable que contienen, cada una, 2 g de carbono. Esta cantidad representa el 28% de la cantidad total de aire fijado, y el 44% de la cantidad total del aire inflamable, respectivamente. Podemos calcular la masa total de cada muestra, con las siguientes operaciones sencillas:<sup>4</sup>

Aire fijado	Aire inflamable
2 g de C es a 28% como $x$ es a 100%	2 g de C es a 44% como $y$ es a 100%
$x = 7.14$ g de muestra total	$y = 4.54$ g de muestra total

Así, la muestra de aire fijado tiene un peso de 7.14 g, de los cuales 2 g son de carbono. Por lo tanto, tenemos:

$$7.14 \text{ g totales de muestra} - 2 \text{ g de C} = 5.14 \text{ g de oxígeno en el aire fijado}$$

Similarmente, con los datos del aire inflamable se puede realizar la misma operación, con lo cual se obtienen 2.54 g de oxígeno para el aire inflamable. Es evidente que 2.54 g es aproximadamente la mitad del oxígeno presente en el aire fijado (5.14 g). Dalton concluyó que el aire fijado tenía el doble de oxígeno que el aire inflamable.

Interpretó este hecho en términos de la existencia de unas supuestas partículas (**átomos**, fue la palabra griega que Dalton utilizó), o sea, que por cada partícula de carbono, el aire fijado tendría el doble número de partículas de oxígeno que el aire inflamable.

Así, si todas las partículas de carbono tuvieran el mismo peso, habría el mismo número de ellas en cada gramo, sea que el carbono proviniera de “aire fijado” o de “aire inflamable”. Lo anterior se desprende de que el peso total ( $w$ ) de oxígeno en cualquiera de las dos muestras es igual al peso ( $W$ ) de una partícula de oxígeno multiplicada por el número ( $N$ ) de partículas presentes:

$$w = NW \quad (2.1)$$

Una analogía puede ayudarte a entender a qué nos referimos. Supón que vas a comprar naranjas y que las naranjas son idénticas entre sí, es decir, que tienen el mismo peso.

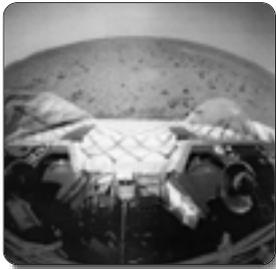
<sup>4</sup> Por el momento haremos uso de “la regla de tres”. En el capítulo cinco introduciremos un método más efectivo para resolver problemas de proporcionalidad directa.

Es evidente que el peso total de naranjas que compres dependerá exclusivamente del número de naranjas que elijas, y viceversa, un número de ellas determina perfectamente su peso total.

Dalton encontró que muchos otros compuestos presentaban la misma regularidad, a la que denominó

**Ley de las Proporciones Múltiples:** los pesos del elemento X que se combinan con un cierto peso fijo del elemento Y para dar lugar a diferentes compuestos, siempre lo hacen en una relación simple de números enteros.

Con estas ideas, Dalton interpretó los resultados de los análisis químicos y concluyó que la relación porcentual en peso de los elementos en los dos gases era diferente porque tenían una distinta proporción de partículas de oxígeno con respecto a las de carbono.



**Figura 2.22**

En el año 2004 llegaron otras tres naves a Marte. Primero arribó el *Beagle 2*, de la Comunidad Europea, y el 25 de enero de 2004 arribó también el *Spirit* (en la imagen): una plataforma inteligente que tomó fotos de la superficie marciana. A éste siguió el *Opportunity*, otra plataforma exploradora. Después de 90 días, se descubrió que sobre la superficie del Planeta Rojo alguna vez hubo agua líquida, y hoy también sabemos que quizás existieron microbios simples como los que dominaron la Tierra hace 3000 millones de años.

## LA HIPÓTESIS ATÓMICA

Nada en nuestra experiencia cotidiana nos indica la existencia real de partículas minúsculas en la materia. El alcance de nuestros sentidos no basta para decidir si la materia es continua o no.

Veamos un ejemplo. Podemos primero mirar la vastedad del mar, luego tomar un vaso del agua del océano, proceder a separar una gota del mismo y más tarde colgar una diminuta cantidad del líquido de la gota en la punta de un alfiler. Hasta allí llega nuestra percepción sensorial, un paso ulterior ya no nos permite ver la sustancia. Todas esas muestras de agua de mar, grandes y pequeñas, parecen contener un líquido homogéneo, con toda una serie de propiedades aparentemente iguales. ¿Por qué no pensar que este proceso de miniaturización puede no terminar nunca? ¿Siempre será posible separar una porción más pequeña de agua y otra y otra? ¿O no?

Para no tratar con un compuesto, como el agua, pensemos en el mismo experimento con un pedazo de alambre de cobre. Imagínate que hacemos divisiones sucesivas para tener pedazos cada vez más pequeños. Los pedazos parecen tener las mismas propiedades que el alambre de cobre original.



Foto pendiente

**Figura 2.23**

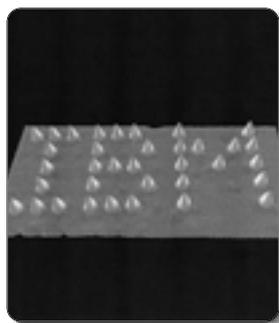
Toda la materia ordinaria está formada por átomos.

de materia que ya no podemos fragmentar sin que pierda las características químicas de la sustancia en cuestión.

Si pudiéramos seguir con las particiones, ¿llegará un momento en que encontremos una partícula que, al dividirla, no conserve las propiedades del alambre original? ¿O siempre será posible continuar con ulteriores divisiones?

Gracias a la ciencia y la tecnología, hemos podido prolongar el alcance de nuestros sentidos con microscopios, sensores, detectores... Y, a esta altura del desarrollo humano, no queda ninguna duda de que llega un momento en que la continuidad de la materia termina estrepitosamente; hay un punto en el que, en efecto, se alcanza una muestra minúscula

Esa partícula es un **átomo**, la partícula más pequeña del elemento que conserva las propiedades químicas del mismo.



**Figura 2.24**  
Fotografía de átomos al microscopio. Las letras IBM están formadas por 35 átomos de xenón colocados sobre una matriz de cobre.

Todos los materiales y sustancias que conocemos, están formados por unos cuantos tipos de partículas: los átomos.

En la actualidad existen técnicas que permiten medir las propiedades de los átomos, incluso tomarles fotografías difusas (ver figura 2.24). Aún así, antes de que se pudieran tomar estos acercamientos, los químicos hablaban con confianza de la existencia de los átomos, explicaban sus reacciones y predecían su comportamiento. La evidencia química de su existencia constituye una historia fascinante.

## Antecedentes del modelo atómico de Dalton

La idea de la existencia de los átomos surgió con Demócrito de Abdera (siglo IV a. de n.e.) en la antigua Grecia.

Sin embargo, las ideas de Demócrito no sirvieron para explicar los fenómenos químicos, puesto que no estaban basadas en evidencias experimentales. Simplemente, podríamos decir que Demócrito tuvo una corazonada que resultó ser acertada.

Tuvieron que transcurrir 21 siglos para que Robert Boyle, entre otros, propusiera que los gases estaban formados por pequeñas partículas, y luego llegar el siglo XIX para que Dalton reviviera los conceptos atómicos de Demócrito, aunque con importantes diferencias:

- Las ideas de Demócrito eran filosóficas, resultado de la reflexión, mientras que las de Dalton se basaban en la observación de las proporciones elementales en los compuestos. Es decir, Dalton explicó con su modelo todo un cúmulo de hechos.
- Demócrito no intentó describir las diferencias entre los distintos átomos, mientras que Dalton sí lo hizo, primordialmente, en función de su diferente peso. Al conocer la composición en peso de una sustancia, Dalton estuvo en la posibilidad de decir qué átomos y en qué proporción constituyen un compuesto.

Así, a partir de los datos de porcentajes de composición en peso de los elementos en muy diversas sustancias, John Dalton propuso, en 1803, que toda la materia está constituida por cierto tipo de partículas que se pueden distinguir por su peso: los átomos. El gran mérito de Dalton fue haber fundamentado su idea en que los átomos de cada elemento se pueden caracterizar por su peso (¡aunque él nunca pudo pesar un átomo aislado!).

Quizá la Ley de la Gravitación Universal de Newton haya sido una inspiración para Dalton.

$$F = \frac{Gm_1m_2}{d^2}$$

La fuerza de atracción entre dos objetos es proporcional al producto de las masas de cada uno y de la inversa del cuadrado de la distancia que los separa. Pero la fórmula dice algo más... dice también que la fuerza de atracción *es independiente* del tipo de materia. Así, dos kilogramos de plomo atraen con la misma fuerza a cinco kilogramos de madera, de azúcar... o de plomo.

Posiblemente Dalton pensó que las sustancias estaban formadas por partículas que se atraían en función de su peso, y que el peso era lo que las caracterizaba.

## Los postulados del modelo atómico de Dalton

Los siguientes postulados son los del **modelo atómico de Dalton**. Del quinto de ellos se deriva inmediatamente la Ley de las Proporciones Múltiples.

1. Todas las sustancias están formadas por átomos.
2. Los átomos son indivisibles.
3. Los átomos del mismo elemento tienen igual peso.
4. Los átomos de diferentes elementos tienen diferente peso.<sup>5</sup>
5. Los compuestos resultan de la combinación de los átomos de diferentes elementos, siempre en proporciones de números enteros pequeños. (Ejemplo: Dos átomos de oxígeno por cada átomo de carbono, en el "aire fijado"; o un átomo de oxígeno por cada átomo de carbono, en el "aire inflamable").
6. Las reacciones químicas ocurren cuando los átomos se separan, se juntan o se reacomodan. Sin embargo, los átomos de un elemento no se transforman en átomos de otro elemento durante una reacción química.

El modelo de Dalton no habla acerca de cómo están constituidos los átomos, sólo de su existencia.

## Los pesos atómicos relativos de Dalton

Las interpretaciones de Dalton acerca de la composición de los compuestos pueden resumirse en una simple ecuación algebraica, construida a partir de la ecuación (2.1), si ahora el número de partículas es igual al número de átomos

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{N_1 W_1}{N_2 W_2}$$

En esta ecuación,  $w_{1,2}$  representan el peso total de cada elemento presente en una muestra de compuesto, tal cual es determinada en el laboratorio;  $N_{1,2}$ , el número de átomos de cada elemento en la misma muestra y  $W_{1,2}$ , el peso de un átomo del elemento 1 o del elemento 2. Es innecesario señalar que los únicos datos experimentales disponibles para Dalton eran los pesos totales  $w_{1,2}$ . Sin embargo, si un compuesto estuviera formado siempre por el mismo número de átomos de 1 que de 2, esto es  $N_1 = N_2$  podríamos anular las "N" en la ecuación anterior y escribir:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{W_1}{W_2}$$

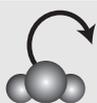
Tan simple como lo anterior (pero ocurrió hace menos de 200 años) fue lo que se le ocurrió a Dalton. Si la evidencia era que  $w_1 = 8$  gramos de oxígeno se combinaban con  $w_2 = 1$  gramo de hidrógeno (y si la relación del número de átomos de cada elemento fue uno a uno) entonces un átomo de oxígeno pesaría 8 veces lo que un átomo de hidrógeno: o sea, el **peso atómico relativo** del oxígeno con respecto al del hidrógeno sería 8.

ELEMENTS			
Hydrogen 1	Strontian 86		
Azote 5	Barytes 85		
Carbon 5	Iron 56		
Oxygen 8	Zinc 65		
Phosphorus 9	Copper 63		
Sulphur 16	Lead 207		
Magnesia 24	Silver 197		
Lime 28	Gold 197		
Soda 46	Platina 318		
Potash 55	Mercury 200		

**Figura 2.25**

La tabla de pesos atómicos de Dalton, con los símbolos de aquella época. Cuando Dalton asigna un peso atómico de 167 al mercurio, quería decir que este átomo era 167 veces más pesado que el hidrógeno (el dato actual es de 200.6 veces más pesado).

<sup>5</sup> Nótese que no es repetición del postulado 3; tú tienes un nombre y sólo uno, pero puede haber otra persona que tenga tu mismo nombre.



TE TOCA A TI:

**Relación de átomos**

De acuerdo con los datos de la tabla 2.3, el aire fijado tiene el doble número de átomos de oxígeno por átomo de carbono que el aire inflamable. ¿Estos datos son suficientes para establecer las fórmulas  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$  para

cada uno de los gases? ¿Por qué no podría tratarse de  $\text{CO}_4$  y  $\text{CO}_2$  o de  $\text{CO}_6$  y  $\text{CO}_3$ ? ¿Hay que tomar alguna consideración adicional para decidirse por un par de fórmulas?

De esta forma Dalton obtuvo los valores de los pesos atómicos de los elementos relativos al hidrógeno (ver figura 2.25).

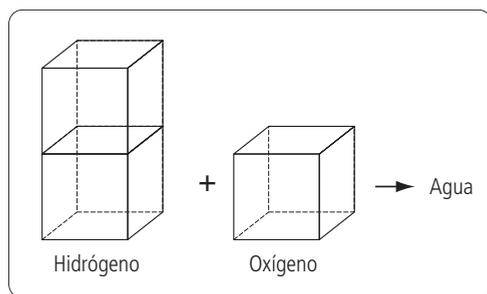
Estos datos se refieren a cocientes entre dos pesos, por lo que no tienen unidades. Se asigna arbitrariamente al hidrógeno como base de la escala, por tratarse del más ligero de los átomos. Su peso relativo es, por lo tanto, de una unidad.

Dalton pensaba que los compuestos más estables y abundantes formados exclusivamente por dos elementos, consistirían de moléculas con un átomo de cada uno de ellos. De esta forma, el agua, el amoníaco y el cloruro de hidrógeno tenían para Dalton las fórmulas  $\text{HO}$ ,  $\text{NH}$  y  $\text{HCl}$ . Si esto estaba mal, como de hecho lo sabemos hoy en los primeros dos casos, los pesos atómicos de oxígeno y nitrógeno tendrían que estar equivocados. No cabe duda de que “los genios” también yerran. El grave problema fue que este error provocó que la tabla de pesos atómicos fuera incorrecta: en el oxígeno por un factor de dos y en el nitrógeno por un factor de tres.

## LA MATERIA SE TRANSFORMA: MOLÉCULAS Y FÓRMULAS

Una de las propiedades más relevantes de un átomo es su peso atómico relativo (con relación al átomo de hidrógeno o al de cualquier otro elemento que se desee establecer como base). Los valores de los pesos atómicos fueron fundamentales en el desarrollo de la tabla periódica. Después de los errores de Dalton al respecto hubo varios trabajos (de Gay-Lussac, Avogadro y Cannizzaro) en los que fueron corregidos finalmente. No obstante, la comunidad científica tardó varias décadas en reconocer como válidos los nuevos resultados. Acerquémonos a esa parte de la historia que se desarrolla en la primera mitad del siglo XIX.

### Ley de los Volúmenes en Combinación

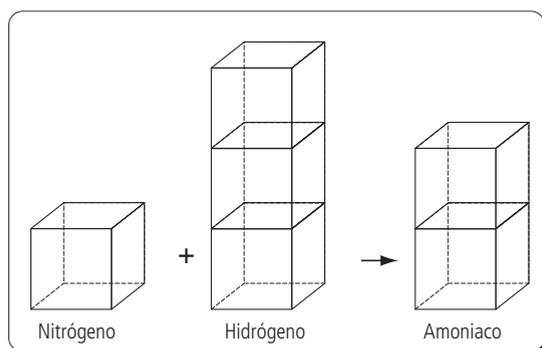


**Figura 2.26**

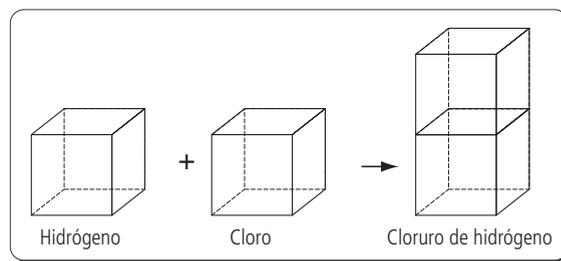
Relación de volúmenes en la síntesis del agua.

En el mismo año en que Dalton postula su teoría atómica, J.L. Gay-Lussac realizó una cuidadosa síntesis del agua. Encontró, sin lugar a equivocación, que dos volúmenes de hidrógeno gaseoso se combinan con un volumen de oxígeno para dar 2 volúmenes de agua gaseosa (ver figura 2.26).

Con el estudio de otras reacciones donde participaban gases, Gay-Lussac obtuvo siempre relaciones sencillas de números enteros en los volúmenes que se combinaban. Para la síntesis del amoníaco encontró que un volumen de nitrógeno se combina con tres de hidrógeno, para dar dos de amoníaco (ver figura 2.27).

**Figura 2.27**

Síntesis del amoníaco. La relación de volúmenes es 1 de nitrógeno por 3 de hidrógeno para dar 2 de amoníaco.

**Figura 2.28**

Un volumen de hidrógeno y uno de cloro resultan en dos volúmenes de cloruro de hidrógeno.

De manera similar, la relación de volúmenes en la síntesis del cloruro de hidrógeno se presenta en la figura 2.28.

Estos resultados sugerían que las fórmulas de Dalton para agua, amoníaco y cloruro de hidrógeno no tendrían que ser similares necesariamente, es decir, todas con un átomo de cada elemento. No era lógico que sus elementos reaccionaran en diferentes proporciones de volumen cuando se combinaban, si en la fórmula propuesta aparece un átomo de cada uno.

Cuando los volúmenes de los gases que participan en una reacción se miden a la misma temperatura y presión, existen entre ellos relaciones sencillas de números enteros pequeños.

## Hipótesis de Avogadro

La conexión entre los volúmenes que se combinaban para dar ciertos compuestos y las fórmulas correctas del producto formado fue planteada por el italiano Amadeo Avogadro. Su aportación se resume en los siguientes dos puntos:

- a) En las mismas condiciones de temperatura y presión, dos gases que ocupan el mismo volumen contienen el mismo número de moléculas.
- b) Ciertos elementos presentan moléculas diatómicas, es decir, pares de sus átomos forman agregados estables.

El primer enunciado, conocido como la Hipótesis de Avogadro, es realmente aventurado para su época. ¿A quién podría ocurrírsele que un gas compuesto por moléculas enormes ocupara el mismo volumen que otro con moléculas muy reducidas, cuando la intuición nos dice que los objetos grandes ocupan más volumen que los pequeños?

No obstante, Avogadro tuvo razón. En un gas las distancias entre las moléculas son tan grandes que podemos decir que la mayor parte de un gas es espacio vacío. El volumen ocupado por las moléculas es mínimo, si lo comparamos con el volumen total que ocupa el gas.

Desafortunadamente nadie hizo caso de las locas propuestas de Avogadro. Dalton era ya famoso en esa época y no soportó la idea de que Avogadro lo corrigiera. Además, argumentó que Gay-Lussac había cometido errores en sus mediciones.

## Los pesos atómicos de Cannizzaro

Debido a ello, el trabajo de Avogadro fue olvidado por casi 40 años, hasta que Stanislao Cannizzaro lo retoma y con ello logra corregir la tabla de pesos atómicos de Dalton.

Cannizzaro utilizó las ideas de Avogadro, al considerar que los elementos podían formar moléculas diatómicas. Además, empleó la ecuación general del estado gaseoso (que ya se conocía en ese momento y que tú conocerás en el capítulo 7) para calcular los pesos atómicos a partir de la densidad de los gases. Construyó una tabla esencialmente correcta de pesos atómicos. La presentación de sus ideas en un congreso científico en 1860, en Karlsruhe, Alemania, revolucionó el mundo de la química, la cual pudo evolucionar mucho más rápidamente desde ese momento.

Con la tabla correcta de pesos atómicos relativos en la mano se pudieron escribir las fórmulas químicas correctas y surgió la inquietud por acomodar sistemáticamente los elementos: la tabla periódica.

### DESCÚBRELO TÚ:

## Moléculas diatómicas, fórmulas y pesos atómicos

¿Puede ser útil una analogía para entender que algunos elementos presentan moléculas con más de un átomo? ¿Es posible atisbar que la fórmula del agua es  $H_2O$  y que el peso atómico relativo del oxígeno es 16 y no 8?

### PRIMERA PARTE: Coruro de hidrógeno

#### Bases de la analogía

1. Un átomo de hidrógeno se representa por un clip pequeño.
2. Un átomo de cloro se representa por un clip estilo mariposa.
3. Supón que la molécula de hidrógeno es monoatómica, lo mismo que la de cloro.
4. Construye una molécula de cloruro de hidrógeno como te plazca, enlazando uno o más clips pequeños (átomos de hidrógeno) con uno o más clips mariposa (átomos de cloro).
5. Recuerda que un volumen dado de cualquier gas contiene el mismo número de moléculas. En nuestro caso, un volumen de gas va a ser representado por una hoja de papel plana que contiene tres moléculas, ni una más ni una menos.

#### Problema

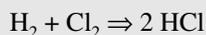
6. Prueba si la hipótesis (3) de monoatomicidad de cloro e hidrógeno te permite construir, con hojas de papel y clips, el modelo de una reacción química

ca hipotética de síntesis del cloruro de hidrógeno, que cumpla a la vez:

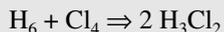
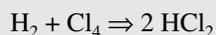
- Con la Ley de Volúmenes en Combinación de la figura 2.28: **una** hoja de papel, cada una con tres moléculas de hidrógeno (un volumen de gas hidrógeno), más **una** hoja de papel con tres moléculas de cloro hechas con clips mariposa (un volumen de gas cloro), nos produce **dos** hojas de papel con tres moléculas de cloruro de hidrógeno cada una (dos volúmenes de cloruro de hidrógeno);
  - y con la Ley de Conservación de la Materia: el número de clips pequeños y mariposa es el mismo antes y después de la reacción.
7. Si es necesario, cambia la fórmula de la molécula de cloruro de hidrógeno del punto 4 para que tu reacción se ajuste a la Ley de Conservación de la Materia. ¿Verdad que no hay manera posible? Todo parece indicar que las moléculas de hidrógeno y de cloro no pueden ser monoatómicas.
  8. Modifica entonces el paso 3, construyendo moléculas de hidrógeno con dos, tres... clips pequeños enlazados, y moléculas de cloro también con dos, tres... clips mariposa enlazados, hasta que encuentres una solución consistente con las dos leyes expresadas en el paso 6.
  9. ¿Obtuviste alguna solución cuando las moléculas de hidrógeno y cloro no son monoatómicas?

Si contestaste afirmativamente el paso 9, acertaste igual que Avogadro. No te preocupes si no alcanzaste

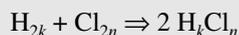
el resultado más simple, que es el aceptado actualmente:



pues son factibles muchas otras soluciones, como las siguientes:



casos particulares de la solución general



donde  $k$  y  $n$  son dos números enteros cualesquiera. Lo que sí es evidente es que las moléculas de los reactivos no pueden ser monoatómicas, sino formadas por un número par de átomos.

### SEGUNDA PARTE: Agua

#### Bases de la analogía

1. Un átomo de hidrógeno será un clip pequeño.
2. Un átomo de oxígeno, un clip mariposa.
3. Escoge un modelo de la molécula del hidrógeno, sea con dos, cuatro, seis... clips pequeños enlazados (ya sabemos de la primera parte que esta molécula está formada por un número par de átomos).
4. Selecciona un modelo de la molécula del oxígeno, con un clip mariposa o dos, tres... de ellos enlazados (de este gas no tenemos información con respecto a sus moléculas).
5. Escoge un modelo de molécula de agua con uno o más clips pequeños (átomos de hidrógeno) enlazados a uno o más clips mariposa (átomos de oxígeno).
6. Sea cual haya sido el modelo de las moléculas de hidrógeno, oxígeno y agua que hayas elegido construir, cabrán exactamente tres de ellas en una hoja de papel (Hipótesis de Avogadro).

#### Problema

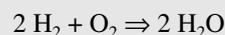
7. Prueba si tu elección de modelos moleculares te permite construir el modelo de una reacción química hipotética de síntesis del agua a partir de sus elementos, que cumpla a la vez:
  - Con la Ley de Volúmenes en Combinación para la síntesis del agua (ver figura 2.26): **dos** hojas de papel cada una con tres moléculas de hidrógeno (dos volúmenes de gas hidrógeno), más **una** hoja de papel con solamente tres moléculas de oxígeno (un volumen de gas

oxígeno), resulta en **dos** hojas de papel con tres moléculas de agua (dos volúmenes de agua gaseosa);

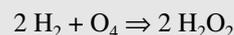
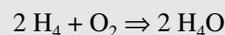
- y con la Ley de Conservación de la Materia: el número de clips pequeños y mariposa es el mismo antes y después de la reacción.

8. Si tu modelo de reacción falla en cumplir con ambas leyes, vuelve a intentar modelos de moléculas de hidrógeno, oxígeno y agua en los pasos (3) a (5), hasta que lo logres.

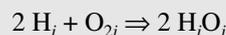
Quizá te hayas encontrado con una desagradable sorpresa respecto a la fórmula del agua, al hallar un resultado diferente al conocido:



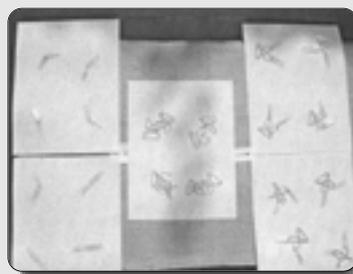
pues son factibles otras posibilidades, como éstas:



o la más general



donde  $i$  es un par (eso habíamos obtenido en la analogía de la primera parte) y  $j$  es un entero cualquiera. Lo que sí es evidente y sorprendente es que de nuevo la molécula de oxígeno no es monoatómica, sino que consta de un número par de átomos,  $2j$ .



**Figura 2.29**

Uno de los resultados posibles de la analogía del agua.

#### Peso atómico del oxígeno: 16

Avogadro y Cannizzaro optaron por la reacción más simple,  $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ . Si tu modelo de reacción no fue precisamente éste, constrúyelo con los clips, como en la figura 2.29. Mira las hojas de papel de los reactivos (hidrógeno y oxígeno) y cuenta los clips (átomos) pequeños y de mariposa que hay en ellas: *partiste del doble número de átomos de hidrógeno (12) que de oxígeno (seis)*. A partir del dato experimental de que la hoja de papel con seis átomos de oxígeno es *ocho veces más pesada* que las dos hojas con los 12 átomos de

hidrógeno, concluye cuál es el cociente del peso de un clip mariposa (átomo de oxígeno) entre un clip pequeño (átomo de hidrógeno). O sea, si seis clips mariposa pesan ocho veces lo que 12 clips pequeños, ¿cuál es el

peso de un clip mariposa con respecto a uno pequeño? ¿Ves?, así, sin pesar nunca un clip pequeño o mariposa pudiste concluir algo sobre sus pesos relativos, como ocurrió en el siglo XIX.

## Fórmulas químicas

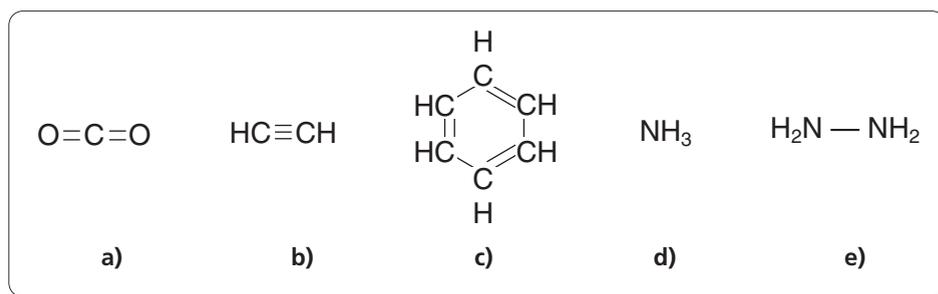
A pesar de los errores de Dalton al determinar las fórmulas, gracias a las correcciones posteriores la idea esencial prevaleció y fue empleada para determinar los pesos atómicos que hoy conocemos y utilizamos, y sobre los que abundaremos un poco más en el capítulo 5.

Una vez aceptada la existencia de los átomos, las fórmulas químicas se pueden reinterpretar. Cuando nos referimos al cloruro de sodio como NaCl, ello debe entenderse como que ese compuesto contiene un átomo de sodio por cada átomo de cloro. Otros ejemplos:

- En la fórmula  $\text{Na}_2\text{S}$  se expresa de forma resumida que en el sulfuro de sodio existen dos átomos de sodio por cada átomo de azufre.
- En la fórmula  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se indica que en el sulfato de sodio se tienen cuatro átomos de oxígeno por cada átomo de azufre y, además, dos átomos de sodio por cada uno de azufre.
- En la fórmula CH se especifica que en un cierto compuesto existe un átomo de carbono por cada átomo de hidrógeno.

En algunos casos, las fórmulas se refieren no sólo a una proporción dada de los átomos de cada elemento presentes en un compuesto, sino a la existencia misma de una **molécula** con esa fórmula, o sea, a la presencia de agregados estables constituidos por unos pocos átomos, y que forman los “bloques constructivos” de dicho compuesto. No puede saberse, de antemano, cuál fórmula química corresponde a una fórmula molecular, ya que se requiere de un estudio sistemático del compuesto para averiguarlo. Los siguientes son ejemplos de **fórmulas moleculares** (ver figura 2.30):

- $\text{CO}_2$  es la fórmula molecular del dióxido de carbono. Este compuesto está constituido por moléculas en las que un átomo de carbono está enlazado a dos de oxígeno.
- $\text{C}_2\text{H}_2$  es la fórmula molecular del acetileno.
- $\text{C}_6\text{H}_6$  es la fórmula molecular del benceno.
- $\text{NH}_3$  es la fórmula molecular del amoníaco.
- $\text{N}_2\text{H}_4$  es la fórmula molecular de la hidracina.



**Figura 2.30**

Las fórmulas moleculares responden a la presencia de agregados estables de átomos (moléculas) en ciertos compuestos. **a)** Dióxido de carbono. **b)** Acetileno. **c)** Benceno. **d)** Amoníaco. **e)** Hidracina.

Es importante hacer notar que tanto el acetileno como el benceno tienen moléculas con el mismo número de átomos de carbono que de hidrógeno. Para ambos compuestos aplicaría la fórmula química  $\text{CH}$ , que se conoce en este caso como **fórmula mínima**, o sea, una que representa solamente la relación de composición de átomos de cada elemento, llevada a su mínima expresión en números enteros. En este mismo sentido, la fórmula mínima de la hidracina sería  $\text{NH}_2$ .

En resumen:

- Una fórmula química expresa las proporciones relativas de los átomos que constituyen el compuesto.
- Una fórmula molecular, además, expresa el número de átomos de cada elemento que forman una molécula del compuesto. Solamente se emplea en el caso de que el compuesto esté realmente constituido por moléculas.
- Una fórmula mínima es la reducción de una fórmula molecular a su mínima expresión entera.

## INTRODUCCIÓN A LA TABLA PERIÓDICA

El descubrimiento de la periodicidad en las propiedades de los elementos se da, como mucho de nuestro conocimiento, a partir de la confianza de que la naturaleza presenta un alto grado de orden y regularidad.

En esencia, la tabla periódica es la síntesis de una enorme cantidad de conocimiento empírico acerca del comportamiento químico de las sustancias elementales y compuestas. Ciertamente, sin embargo, no dice nada acerca del por qué de tal comportamiento, cuestión que se elucidó en el siglo XX.

Hacia 1830 se conocían 55 elementos, pero no había claridad acerca de cómo ordenarlos de forma sistemática de acuerdo con un patrón de similitud en su comportamiento.

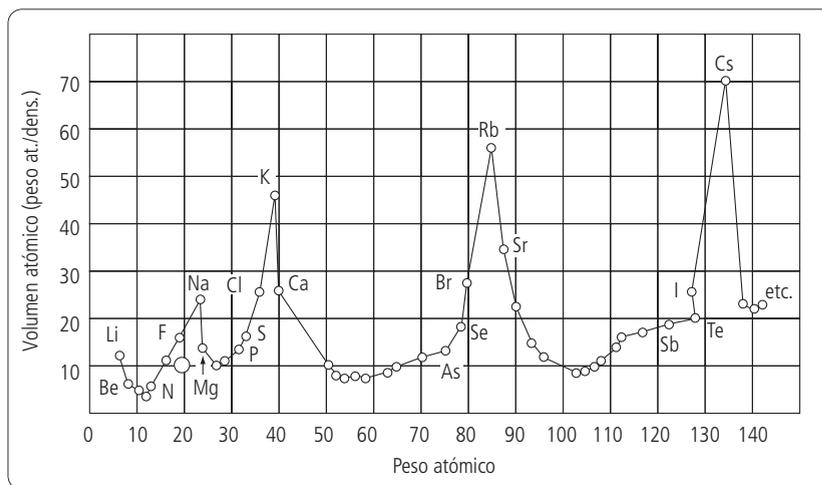
En 1860 se celebró el Primer Congreso de Química (en Karlsruhe, Alemania) y, aunque no se llegó a acuerdos, Stanislao Cannizzaro logró filtrar una idea importante:

*“Aprovechemos las propiedades físicas en la determinación de los pesos atómicos”.*

Como las relaciones entre la física y la química, o más bien, entre los físicos y los químicos de entonces no eran muy buenas (incluso se hablaba de “átomos físicos”, distintos por supuesto de los “átomos químicos”), la sugerencia de Cannizzaro fue novedosa... y provechosa. Poco tiempo después se aceptaron los valores de los pesos atómicos que propuso, con los que se pudo hacer un primer ordenamiento de los elementos.

Varias de las propuestas incompletas, que habían surgido y surgieron entonces, con respecto a la existencia de comportamientos similares para los diversos elementos (como las tríadas de J.W. Döbereiner, la hélix telúrica de De Chancourtois, o las octavas de Newlands) dieron entonces paso a la contribución definitiva de Dimitri I. Mendeleiev y J. Lothar Meyer quienes, de manera independiente y casi simultánea, dieron con la respuesta: la Ley Periódica.

Meyer construyó la gráfica de la figura 2.31, conocida como “curva de Lothar Meyer”. El llamado **volumen atómico** se obtiene como el cociente del peso atómico relativo del elemento entre su densidad como líquido o sólido. En la figura resulta claro el comportamiento periódico de esta propiedad. Es evidente, por ejemplo, que los máximos volúmenes se dan en los metales alcalinos (Li, Na, K, Rb y Cs) y que hay una recurrencia con un período ciertamente variable.



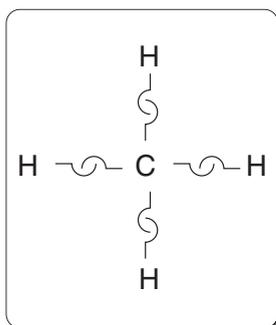
**Figura 2.31**  
Gráfica de volúmenes atómicos de Lothar Meyer.

De las muy diversas formas de comportamiento químico de los 63 elementos conocidos en tiempos de Mendeleiev hay una, muy peculiar, considerada como fundamental por el genio ruso: la valencia.

El concepto de valencia se debe a Edward Frankland y se refiere a la “capacidad de combinación” de los átomos de un elemento con otro. Debemos decir que las palabras *valiente*, *valor* y... *valer* son del mismo origen etimológico que *valencia*.

Las valencias más comunes de los elementos pueden obtenerse al observar cómo participa en la fórmula de sus compuestos:

- El hidrógeno tiene una valencia de uno. Nunca se enlaza más de un átomo de otro elemento a un dado átomo de hidrógeno.
- En el agua, como el oxígeno está combinado con dos átomos de H, su valencia es dos.
- En el amoníaco, el nitrógeno está combinado con tres hidrógenos, así que su valencia es de tres.
- El carbono presenta una valencia de 4 en muchos compuestos, pues reacciona ya sea con cuatro hidrógenos (para formar metano,  $\text{CH}_4$ ), o con dos oxígenos (para dar dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ ).
- Dependiendo cómo esté combinado con otros, un elemento puede tener más de una valencia. Por ejemplo, el carbono es divalente en el  $\text{CO}$  y tetravalente en el  $\text{CO}_2$ ; el azufre es divalente en el  $\text{H}_2\text{S}$ , tetravalente en el  $\text{SO}_2$  y hexavalente en el  $\text{SO}_3$ .



**Figura 2.32**  
Un átomo con valencia cuatro o tetravalente era un átomo con cuatro ganchos enlazantes.

La forma en que se representaba la valencia nos puede parecer hoy ingenua (como muchas ideas del pasado), pero era efectiva y simple: un átomo con valencia cuatro, como el carbono, era un átomo con cuatro “ganchos” que le permitían atrapar a otros cuatro átomos univalentes. La valencia era igual al número de ganchos que tenía cada átomo para enlazarse con otros (ver figura 2.32).

La tabla 2.4 muestra de qué manera Mendeleiev ordenó los elementos por medio de su valencia más común. En ésta, R representa a cualquier elemento químico. En el primer ejemplo de la tabla, la valencia es igual a uno porque dos átomos de R se combinan con

**Tabla 2.4**

Valencia de los elementos, mostrada al combinarse con oxígeno o hidrógeno.

Valencia	1	2	3	4	3	2	1
Compuesto	R <sub>2</sub> O	R <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>4</sub> H <sub>4</sub> R	H <sub>3</sub> R	H <sub>2</sub> R	HR

un oxígeno, que es divalente. De forma similar, cuando la valencia es igual a cuatro, cada átomo de R se enlaza con dos oxígenos o con cuatro hidrógenos monovalentes.

Parte del éxito de Mendeleiev estriba en que modificó el enfoque del problema. No sólo creyó en el peso atómico como un criterio para ordenar, también consideró las propiedades químicas de los elementos, en especial la valencia. Con ambos criterios, y una enorme intuición, llegó a la tabla periódica. Para su trabajo, en lugar de usar gráficas, como Meyer, empleó un conjunto de tarjetas que tenían escritas las propiedades de los elementos, las cuales ordenaba. De esta manera la periodicidad era más obvia... y más manejable, como si las tarjetas fueran barajas de un mazo que se ordenan sobre la mesa.<sup>6</sup>

Entonces, Mendeleiev escribía un libro de texto que sería mundialmente famoso, donde trató la clasificación de los elementos. Hagamos el intento de construir su tabla.

## La construcción de la tabla periódica de Mendeleiev

El tiempo histórico en el que Mendeleiev vivió le permitió hacer dos importantes suposiciones. Una, que no todos los elementos habían sido descubiertos y, la segunda, que los valores de los pesos atómicos tenían un alto grado de incertidumbre. Él pudo seguir su intuición aun cuando estuviera en contra de lo conocido, porque siempre pensó que los elementos faltantes finalmente se descubrirían y que la corrección de los pesos atómicos se daría en algún momento.

El hidrógeno fue colocado en la clasificación de Mendeleiev en una línea para él solo, debido a lo peculiar de sus propiedades. En la segunda línea (o segundo período) colocó los primeros siete elementos, del litio al flúor, ordenados según sus pesos atómicos crecientes (ver tabla 2.5).

**Tabla 2.5**

Primeras dos filas en la tabla periódica de Mendeleiev.

H							
Li	Be	B	C	N	O	F	

Así acomodados, la valencia de los elementos iba en aumento de izquierda a derecha: 1 en hidrógeno y litio, 2 en berilio, 3 en boro, hasta llegar a 4 en el carbono del centro, y comenzar a descender con 3 en nitrógeno, 2 del oxígeno y 1 del flúor.

Luego colocó los siete siguientes elementos: del sodio al cloro, con el cuidado de corroborar que coincidieran sus propiedades con las del elemento que encabezaba esa columna (ver tabla 2.6). Así, el sodio quedó debajo del litio por ser ambos metales univalentes de baja densidad, que se pueden cortar fácilmente con un cuchillo, que reaccionan con el agua violentamente para dar álcalis, como se conocían a los hidróxidos de litio y sodio.

<sup>6</sup> Según afirman algunos autores, Mendeleiev era un entusiasta del "solitario".

**Tabla 2.6**

Tres primeras filas en la tabla de Mendeleiev. Se indica por primera vez el valor de la valencia en el encabezado de las columnas

Valencia	1	2	3	4	3	2	1
	H						
	Li	Be	B	C	N	O	F
	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl

Por ello ambos elementos se conocen como metales alcalinos. Algo similar se corrobora entre berilio y magnesio, que forman parte de la familia de los metales alcalino-térreos, o entre boro y aluminio, y así sucesivamente.

Al iniciar la cuarta línea, el potasio (K) quedó debajo del sodio (con valencia 1) y el calcio (Ca) bajo el magnesio (Mg), ambos divalentes. Las propiedades químicas de los elementos fueron más importantes que los pesos atómicos para el ordenamiento. Si la apariencia y las reacciones químicas del litio, sodio y potasio eran muy semejantes, y lo mismo podía decirse de flúor, cloro y bromo, estos elementos tenían que estar acomodados en las mismas columnas.

Cuando llegó al titanio debió quedar (por su peso atómico) a continuación del calcio. Pero las propiedades químicas del titanio (su tetravalencia en algunos compuestos) lo llevaron a colocarlo debajo del carbono y el silicio. Con ésto el titanio se colocó en la cuarta columna y quedó una vacante. Vale la pena aclarar que después del titanio Mendeleiev colocó los átomos del vanadio al zinc, como puedes observar en la versión final de su tabla en la figura 2.33. A continuación, Mendeleiev pensó que le faltaba conocer dos elementos, el eka aluminio (con peso atómico 68) y el eka silicio (con peso atómico 72), viniendo después el arsénico, el selenio y el bromo, los cuales hemos colocado al final del cuarto período en la tabla 2.7.

El mismo Mendeleiev aclara:

*“Los espacios vacíos corresponden a elementos que quizá sean descubiertos con el transcurso del tiempo...”*

**Tabla 2.7**

Las cuatro primeras filas en la tabla de Mendeleiev. El titanio tiene valencia cuatro, como el carbono y el silicio, por lo que don Dimitri lo colocó debajo de éstos y dejó un espacio vacío, que después sería ocupado por el escandio.

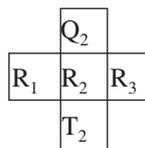
Valencia	1	2	3	4	3	2	1
	H						
	Li	Be	B	C	N	O	F
	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl
	K	Ca	—	Ti	As	Se	Br

ya que:

*“Las propiedades de los elementos, lo mismo que las formas y propiedades de sus compuestos, dependen periódicamente o son función periódica, de los pesos atómicos de los elementos”.*

El hecho de que se hubieran descubierto nuevos elementos con cierta frecuencia llevó a Mendeleiev a suponer que habría otros aún no identificados, de forma que decidió dejar espacios en blanco cuando no podía “cuadrar” los datos. Sabedor de que más de una vez se habían modificado los valores de los pesos atómicos debido a errores en las mediciones, se tomó la licencia de modificar el orden estricto de “pesos atómicos crecientes” en caso de que algo no ajustara. Un ejemplo; el telurio (masa atómica 127.6, valencia 2) tuvo que colocarlo delante del yodo (masa atómica 126.9, valencia 1) a fin de mantener el primero en la columna de valencia 2 y al yodo en la de valencia 1.

La Ley Periódica no sirvió sólo para determinar algunos pesos atómicos y predecir las propiedades de esos elementos. Mostró analogías insospechadas entre elementos y compuestos y permitió predecir las propiedades de elementos aún no descubiertos. Para ello, una vez más, Mendeleiev explica:



*“Si se encuentran en un renglón los elementos R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> y R<sub>3</sub> consecutivos, y si en la columna que contiene al R<sub>2</sub> el elemento Q<sub>2</sub> le precede y el T<sub>2</sub> le sigue, las propiedades de R<sub>2</sub> están determinadas por la media de las propiedades de R<sub>1</sub>, R<sub>3</sub>, Q<sub>2</sub> y T<sub>2</sub>. Así, por ejemplo, el peso atómico de R<sub>2</sub> será:*

$$R_2 = \frac{1}{4}(R_1 + R_3 + Q_2 + T_2)$$

En la figura 2.33 se muestra la tabla periódica que Mendeleiev presentó en 1872. Las rayas corresponden a elementos aún no conocidos en esa época. Con los años, uno a uno fueron apareciendo estos “elementos perdidos” y cumplieron todos ellos con las propiedades que Mendeleiev les asignó sin conocerlos.

El primer elemento que confirmó las predicciones de Mendeleiev (1871) fue el galio (Ga), llamado por el ruso “eka-aluminio” (en sánscrito *eka* significa “uno”, algo así como “el primero después del aluminio”). En 1875 Paul Emile Lecoq de Boisbaudran eligió el nombre de “galio” a fin de aliviar un poco el derrotado honor francés por la guerra franco-prusiana. Pero... comparemos lo predicho por don Dimitri con su fórmula para el eka-aluminio con lo que Lecoq obtuvo para el galio:

Propiedad	Eka-aluminio	Galio
Masa atómica	aprox. 68	69.9
Densidad	5.9	5.93
Punto de fusión	bajo	30.1 °C
Fórmula del óxido	Ea <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

De manera análoga las propiedades del escandio, descubierto en 1879, y las del germanio (1886) coincidieron con las predicciones de Mendeleiev, quien a pesar de estos

Grupo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Oxidos e hidruros típicos	$R_2O$ —	$RO$ —	$R_2O_3$ —	$RO_2$ $H_4R$	$R_2O_5$ $H_5R$	$RO_3$ $H_3R$	$R_2O_7$ $HR$	$RO_4$ —
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	H(1)							
	Li(7)	Be(9.4)	B(11)	C(12)	N(14)	O(16)	F(19)	
	Na(23)	Mg(24)	Al(27.3)	Si(28)	P(31)	S(32)	Cl(35.5)	
	K(39)	Ca(40)	—(44)	Ti(48)	V(51)	Cr(52)	Mn(55)	Fe(56), Co(59), Ni(59), Cu(63)
	[Cu(63)]	Zn(65)	—(68)	—(72)	As(75)	Se(78)	Br(80)	
	Rb(85)	Sr(87)	?Y(88)	Zr(90)	Ni(94)	Mo(96)	—100	Ru(101), Rh(104), Pd(106), Ag(108)
	[Ag(108)]	Cd(112)	In(113)	Sr(118)	Sb(122)	Te(125)	H(127)	
	Cs(133)	Ba(137)	?D(138)	?Ce(140)	—	—	—	
	—	—	—	—	—	—	—	
	—	—	?Er(178)	?La(180)	Ta(182)	W(184)	—	Os(195), Ir(197), Pt(198), Au(199)
	[Au(199)]	Hg(200)	Tl(204)	Pb(207)	Bi(208)	—	—	
	—	—	—	Th(231)	—	U(240)		

**Figura 2.33**

Clasificación periódica de los elementos, Mendeleiev (1872).

éxitos se hallaba insatisfecho por el gran número de huecos existentes en el renglón del cesio.

En 1894, cuando fue descubierto el argón, el primer “gas noble” no se conocía ninguna sustancia no reactiva. Consistente con la tabla periódica de Mendeleiev, este elemento fue colocado en la octava columna, donde le correspondía la valencia 0. Esto implicaba la existencia de otros gases ¡que fueron descubiertos en los años siguientes! Helio, neón, kriptón y xenón se ajustaron a la tabla, tanto por sus pesos atómicos como por su no-reactividad. Hubo, con todo, algunos ajustes (o “trampas”, como se prefiera): entre el argón y el potasio las masas atómicas no siguen un orden creciente, ya que el argón tuvo que intercambiarse con el potasio para que quedara en la columna de valencia cero.

Dimitri Mendeleiev, vivió hasta 1907 para presenciar buena parte de los descubrimientos que ratificaron sus predicciones.

## Tabla periódica larga

La tabla 2.8 presenta la llamada “tabla periódica larga moderna”. Existen similitudes con la de Mendeleiev, pero también algunas diferencias. Los gases nobles se encuentran en el último grupo, a la derecha. Las columnas ya no se ven encabezadas por la valencia, sino por una numeración progresiva de los 18 grupos o familias de elementos. Los nombres y pesos atómicos de todos ellos se pueden encontrar en el Apéndice 2.

Las siguientes cuestiones son importantes en la tabla periódica larga:

- Los llamados “elementos representativos”, que hemos presentado en las tablas anteriores, se encuentran en los grupos 1, 2 y 13 a 18.
- Los elementos en los grupos 3 a 12 son los llamados “metales de transición”.
- Los elementos de las dos últimas filas son los “metales de transición interna”. La primera de ellas, los lantánidos, tiene pesos atómicos entre el del lantano, La, y

el del hafnio, Hf. La segunda, o actínidos, los tiene mayores que el actinio, Ac, pero menores que el rutherfordio, Rf.

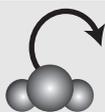
- La mayor parte de los elementos son metales (las casillas con fondo blanco en la tabla 2.8), pues tienen brillo metálico si están pulidos, son sólidos a temperatura ambiente (excepto el mercurio, que es líquido) y conducen bien la corriente eléctrica y el calor.
- Por el contrario, los llamados “no-metales” (las casillas con fondo más oscuro en la tabla 2.8) no tienen aspecto metálico, algunos son gases, uno es líquido (el bromo) y, los que son sólidos, resultan ser quebradizos, ninguno conduce adecuadamente ni el calor ni la electricidad.
- En la frontera entre los metales y los no-metales existen varios elementos que presentan una mezcla de propiedades, y que se conocen como “metaloides” (los que tienen pantalla intermedia en la tabla).
- En una misma familia se presenta el caso de que algunos elementos son no-metales, otros metaloides y otros metales, como puedes ver en el grupo del carbono. Se dice por ello que el carácter metálico de los elementos se incrementa conforme se desciende en un grupo de la tabla.
- Finalmente, el símbolo de los elementos que por su corta vida radiactiva no están presentes en la naturaleza, se presentan con letras subrayada.

**Tabla 2.8**

Tabla periódica larga. Actualmente ya no hay huecos debidos a los elementos por descubrir. Poco a poco fueron apareciendo todos, para dar razón del ordenamiento de Mendeleiev.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	<u>Tc</u>	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac <sup>o</sup>	<u>Rf</u>	<u>Ha</u>	<u>Sg</u>	<u>Ns</u>	<u>Hs</u>	<u>Mt</u>									
*Lantánidos		Ce	Pr	Nd	<u>Pm</u>	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
<sup>o</sup> Actínidos		Th	Pa	U	<u>Np</u>	<u>Pu</u>	<u>Am</u>	<u>Cm</u>	<u>Bk</u>	<u>Cf</u>	<u>Es</u>	<u>Fm</u>	<u>Md</u>	<u>No</u>	<u>Lr</u>		

Así como las leyes de Kepler describían el movimiento de los planetas sin explicarlo (hasta que llegó Newton), la Ley Periódica de Mendeleiev sólo describía propiedades químicas. La explicación llegó con la mecánica cuántica en el siglo XX, tema que abordaremos más adelante en esta obra.



TE TOCA A TI:

### La predicción de las propiedades

¿Sabes qué es el talio? ¿Alguna vez has escuchado algo acerca de él? Localízalo en una tabla periódica. De sus dos vecinos laterales seguramente sí has oído algo, y tal vez hasta mucho. Lista los efectos de los vecinos laterales del talio en los seres vivos. Con esta informa-

ción, atrévete a hacer una predicción sobre los efectos del talio en los seres vivos. Busca en la bibliografía la información necesaria para corroborar tu predicción. Busca también en la etiqueta de algún raticida comercial si su formulación contiene talio.

## DESCÚBRELO TÚ: Metal o no-metal

Colaboración de Rosa María González Muradas.

¿Qué propiedades físicas permiten distinguir a los metales?

La mayoría de nosotros conocemos las propiedades metálicas típicas. Veamos si las podemos identificar en la práctica.

### Material

- 8 tubos de ensayo y una gradilla
- Agua destilada
- Probeta graduada de 25 mL
- Dispositivo para medir la conductividad
- Muestras de los siguientes elementos en trozos: azufre, carbono, grafito, estaño, fósforo negro, hierro, magnesio, yodo y zinc.

### Procedimiento

Tu profesor te entregará 8 muestras de elementos.

### Observación de las propiedades físicas

Observa y anota las siguientes propiedades físicas: color, lustre, forma, maleabilidad y fragilidad.

### Determinación de la conductividad eléctrica

Mediante un dispositivo como el de la figura 2.34 determina si pasa la corriente a través de la muestra, tocándola con los electrodos sin que éstos se toquen entre sí.



**Figura 2.34**  
Dispositivo para verificar la conductividad eléctrica.

### Determinación de la densidad

Para cada uno de los elementos determina el peso de la muestra. Coloca 20 mL de agua en una probeta de 25 mL y añade la muestra del elemento, de manera que quede totalmente sumergida en el agua. Mide la variación en el volumen. Calcula su densidad. Si alguno de los elementos flota en el agua, ¿Qué densidad le asignarías?

Anota tus resultados en una tabla en la que registres las siguientes propiedades: elemento, color, lustre, maleabilidad, fragilidad, conducción de la corriente y densidad.

Intenta clasificar estos elementos como metales o no-metales. Comenta si dicha asignación es inequívoca o si existen algunos datos atípicos que compliquen la clasificación.

## DESCÚBRELO TÚ: Sales a la llama

Colaboración de Rosa María González Muradas.

¿Cuál es el catión presente en una sal desconocida?

Al cocinar, ¿has dejado caer alguna vez una poca de sal común sobre el fuego de la estufa? ¿Has notado que el color de la llama cambia a amarillo?

Puedes intentar comparar el color que toma el cloruro de sodio con el del bicarbonato de sodio, presente en la sal de uvas, o con el que produce el hidróxido de sodio de la sosa o lejía para destapar cañerías. Si lo ha-

ces, comprobarás que el color de la llama no varía al cambiar la sustancia, siempre y cuando sea de sodio.

El fenómeno de presentar una coloración particular al exponer las sales al fuego ha sido empleado para identificar los elementos químicos desde mediados del siglo XIX. Kirchhoff y Bunsen (el inventor del mechero que lleva su nombre) descubrieron varios elementos mediante este procedimiento y los nombraron haciendo alusión al color que producen. Así el rubidio obtuvo ese nombre del rojo rubí y el cesio (del latín *caesium*, cielo), del azul.

**Material**

- Placa de porcelana con 9 celdas.
- Un mechero Bunsen.
- Ácido clorhídrico concentrado.
- Un tubo de ensayo para el ácido.
- Una puntilla de grafito (puede utilizarse un lápiz, pelando la madera que cubre la puntilla) o alambre de nicromel.
- Sales de los siguientes cationes: Na, K, Ca, Ba, Sr, Cu, Pb, Zn.
- Una sal desconocida.

**Procedimiento**

Coloca una pequeña cantidad (aproximadamente 0.05g) de cada sal en cada una de las celdas de la placa. Anota su identidad.

Introduce la puntilla de grafito o el alambre de nicromel en el ácido clorhídrico. Ten cuidado al manejar el ácido, dada su corrosividad (si cae en alguna parte de tu cuerpo lávala abundantemente con agua).

Toma con la puntilla un poco de la muestra de la primera sal y llévala a la base no luminosa de la llama del mechero. Observa y anota en una tabla la coloración que se produce en cada caso.

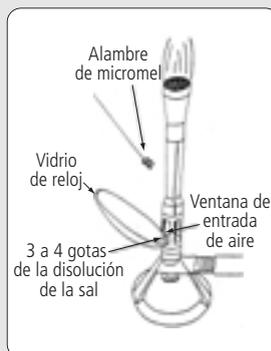
Si no es muy apreciable el color de la llama, puedes intentar el arreglo de la figura 2.35. La sal se disuelve en unas pocas gotas de agua y se coloca lateralmente sobre el vidrio curvado de unas gafas, justo a la entrada de aire del mechero. El alambre de nicromel se

calienta al rojo vivo en la llama hasta que no muestre emisión colorida (lávalo con ácido clorhídrico varias veces) y con él se toca la disolución de la sal, la cual hierve de inmediato, con lo que entra mezclada con el aire del mechero y produce una llama completa con intenso color.

Lava perfectamente la puntilla con ácido, después de terminar con cada sal. La más difícil de limpiar es la sal de sodio, por lo que te recomendamos que sea la última que utilices.

Realiza la prueba con la sal desconocida. Utiliza para ello una nueva puntilla. Compara el color que ésta presenta a la llama con los obtenidos para las muestras conocidas.

¿Cuál es el catión presente en la sal desconocida?



**Figura 2.35**

Arreglo para hacer más intensa la coloración de la llama en el mechero.



DEL PASADO:

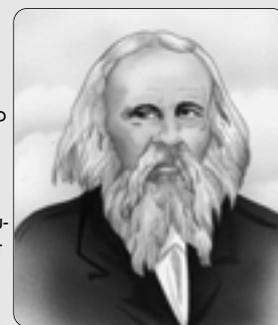
## Dimitri Mendeleiev

Este pilar de la química moderna, nacido en Siberia en 1834, fue el menor de 17 hijos. Cuando tenía 15 años su madre lo acompañó en el largo recorrido hacia Moscú, donde le fue negada la admisión a la Universidad. Continuó su camino hasta San Petesburgo, donde logró entrar al Instituto Pedagógico de la Universidad. Ahí obtuvo el título de químico y fue más tarde titular de la cátedra de química general, así como consejero de la industria rusa del petróleo.

Motivado por su deseo de transmitir a sus estudiantes, en una forma lógica y sistematizada, la ya entonces gran cantidad de información química que se tenía sobre los elementos conocidos, y lamentándose de la no existencia de un buen libro de texto, inició la escritura del suyo.

**Figura 2.36**

Dimitri Ivanovitch Mendeleiev (1834-1907). Nacido en Siberia en una familia humilde, se educó en San Petesburgo. Fue llevado a Europa junto con otros estudiantes rusos para estudiar química con los maestros más eminentes, como Kirchoff y Bunsen, Kekulé y Erlenmeyer. En 1869 propone su tabla periódica, una de las mayores aportaciones de los seres humanos a la ciencia química. Todos los retratos de Mendeleiev lo muestran con el cabello largo, costumbre que adoptó al cortárselo sólo una vez al año, en la primavera, aunque en otras épocas del año tuviera reuniones importantes.



A diferencia de Dalton, que nunca encontró tiempo para casarse, Mendeleiev se casó por segunda vez a los 42 años. La iglesia ortodoxa rusa lo acusó de bigamia, a pesar de estar divorciado legalmente de su primera esposa. Mendeleiev era ya famoso en aquella época por lo que, cuenta la historia, el zar de Rusia ante las acusaciones que le hicieran sobre el maestro contestó:

“Mendeleiev tiene dos esposas, sí, pero yo tengo un solo Mendeleiev”.

El gran éxito de Mendeleiev fue ordenar la información química dispersa existente. En nuestros días la

organización de los datos experimentales es el primer paso para su interpretación correcta.

Así, modificaciones más, modificaciones menos, la tabla periódica llegó para quedarse. Un químico o una química que la conozca puede, sin haber nunca tenido contacto con algún elemento en particular, predecir con bastante precisión muchas de sus propiedades físicas y químicas, con tan sólo conocer su posición en dicha tabla. Sin duda una de las aportaciones más importantes de la humanidad a la química.

## PROBLEMAS Y ACTIVIDADES

1. El emperador Diocleciano (ca. 300 de n.e.) ordenó destruir todos los tratados de alquimia. Una de las razones era que, según pensaban, los alquimistas llegarían a producir mucho oro. ¿No es contradictorio? ¿Por qué habrían de prohibirla? ¿En qué afectaba tener mucho oro? ¿Qué repercusiones podría tener hoy una producción masiva de oro?
2. En la antigua China los médicos del Emperador recibían su salario sólo si el Emperador estaba sano. ¿Cómo lo explicas?
3. Con la información que puedas obtener sobre la alquimia, escribe un breve ensayo en el que menciones los aparatos que aún utilizamos de aquella época.
4. Cuando un sólido *A* se calienta se observa que se forma un gas *B* y un sólido blanco *C*. El sólido blanco se descompone también al fundirlo en presencia de la corriente eléctrica, en un gas verde *D* y un líquido metálico *E*. ¿Cuáles de estas sustancias son compuestos y cuáles podrían ser elementos?
5. Utiliza los datos de la tabla 2.3 y calcula la cantidad de oxígeno presente en el aire fijado y en el aire inflamable, cuando la cantidad de carbono en cada una de las muestras es igual a 28 g. La relación porcentual entre el peso de *C* y el peso de *O* en una muestra ¿depende de la cantidad de carbono presente? Justifica tu respuesta.
6. Se tienen muestras de dos gases formados por nitrógeno y oxígeno, exclusivamente. El análisis de su composición muestra los siguientes resultados:

	% en peso de nitrógeno	% en peso de oxígeno
Compuesto 1	46.66	53.33
Compuesto 2	30.43	69.56

¿Cuál de los dos compuestos tienen más oxígeno? Si la masa de nitrógeno es la misma en ambos e igual a 3g, ¿cuántos gramos de oxígeno hay en cada muestra? ¿Se cumple la Ley de las Proporciones Múltiples?

7. Consulta los siguientes artículos para hacer una semblanza breve de Gay Lussac:
  - a) Laing, M., “Gay-Lussac: Chemist Extraordinary”, *J. Chem. Educ.* 1981, 58, 789 (1981).
  - b) Goldwhite, H., “Gay-Lussac After 200 Years”, *J. Chem. Educ.* 1978 55, 366 (1978).
8. Vuelve a aplicar la estrategia de los clips de la sección “DESCÚBRELO TÚ: Moléculas diatómicas, fórmulas y pesos atómicos” en el caso de la síntesis del amoníaco, con la ley de volúmenes en combinación de la figura 2.27, para demostrar que la molécula de nitrógeno debe estar formada por un número par de átomos y que la expresión más sencilla de la fórmula de la molécula de amoníaco es  $\text{NH}_3$ .
9. Sabiendo que las moléculas de oxígeno y nitrógeno son diatómicas, traza un diagrama de la Ley de Volúmenes en Combinación como el de la figura 2.26 para las síntesis de los cinco óxidos del nitrógeno:  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}_5$ .

10. Argumenta por qué el cociente del peso atómico entre la densidad tiene algo que ver con el volumen atómico, como lo propuso Lothar Meyer. Si por ahora no puedes responder esta pregunta, hazlo después de concluir el estudio del capítulo 5.
11. Explica con tus propias palabras el significado de la siguiente ecuación mencionada en el texto:

$$R_2 = \frac{1}{4} (R_1 + R_3 + Q_2 + T_2)$$

Describe las consecuencias que tuvo el que Dimitri Mendeleiev estableciera esta relación.

12. Investiga en qué consistieron las propuestas de ordenamiento de los elementos llamadas “tríadas de Döbereiner”, “hélix telúrica de De Chancourtois”, o las “octavas de Newlands”.
13. Basado en las propiedades físicas y químicas de los elementos, busca argumentos para defender la idea de que azufre y selenio deben formar parte de la misma familia.
14. Para cada uno de los cambios descritos, decide si se formó algún elemento a partir de algún compuesto o se formó un compuesto a partir de sus elementos.
- Al calentarse, un polvo azul se volvió blanco y perdió masa.
  - Un sólido blanco forma tres gases diferentes al calentarse. La masa total de los tres gases es igual a la del sólido.
  - Después de que un metal rojizo se coloca en la llama, se pone negro y su masa aumenta.
  - Un sólido blanco se calienta en presencia de oxígeno y forma dos gases. La masa total de los gases resulta ser la misma que la suma de las masas del sólido y del oxígeno.
15. Clasifica la información que se da en cada uno de los siguientes enunciados como cuantitativa o cualitativa, al igual que como relacionada con una propiedad física o una propiedad química.
- Una muestra de un compuesto químico blanco tiene una masa de 1.345 g, y cuando se le coloca en agua que tiene un colorante rojo hace que la disolución se vuelva incolora.
  - Una muestra de litio metálico con una masa de 0.5 g se colocó en agua. El metal reaccionó con el agua para dar el compuesto hidróxido de litio más el elemento hidrógeno.
  - El compuesto químico etanol hierve a 79 °C.
  - Un compuesto químico que contiene plomo y azufre forma cristales amarillos brillantes en forma de placas.
  - Un litro de agua, teñida con un colorante púrpura, se hizo pasar a través de un filtro de carbón, el cual adsorbió el colorante, y el agua que pasó resultó incolora.
16. Da los nombres y símbolos de **a)** tres elementos que sean metálicos **b)** cuatro elementos que sean no-metálicos, y **c)** dos elementos que sean metaloides. En cada caso ubica estos elementos en la tabla periódica larga, dando el grupo y el período en el que se encuentran.
17. Da los nombres y símbolos de tres elementos metales de transición. Búscalos en una enciclopedia y lista los usos mencionados de cada uno de los tres elementos.
18. ¿Cuántos períodos de la tabla periódica cuentan con ocho elementos? ¿Cuántos tienen 18 elementos? ¿Cuántos tienen 32 elementos?

## BIBLIOGRAFÍA

- Atkins, P.W., Clugston, M.J., Frazer, M.J. y Jones, R.A.Y., *Chemistry. Principles and Applications*. Longman, Londres y Nueva York, 1988.
- Bare, W.D., Bradley, T., y Pulliam, E., “An Improved Method for Students’ Flame Test in Qualitative Analysis”, *J. Chem. Educ.* 1998, 75, 459.
- Chang, R. *Química*, McGraw Hill, 4a edición, México, 1991.
- Crosland, M.P., *Estudios históricos en el lenguaje de la química*, UNAM, México, 1988.
- Garriz, A. y López-Ávalos, M., “La química colonial. Bartolomé de Medina y Andrés Manuel del Río”, en *Química en México. Ayer, hoy y mañana*, Andoni Garriz compilador, Facultad de Química, UNAM, México 1991.
- Lavoisier, A.L., *Tratado elemental de Química*, edición facsímil de la traducción al español del original en francés hecha en la Nueva España en 1797, UAM-Xochimilco, México, 1990.
- Salzberg, H.W., *From Caveman to Chemist. Circumstances and Achievements*, American Chemical Society, Washington, 1991.
- Vogel, A.I., *Química analítica cualitativa*, Editorial Kapelusz, 5a edición, 1974.

**A**

Actínidos, 68  
 Agua  
   electrólisis del, 44  
 Akenatón, 41  
 Alcalinos  
   metales, 65  
 Alcalino-térreos  
   metales, 65  
 Alejandría  
   Biblioteca de, 40  
 Alejandro Magno, 40  
 Alquimia, 35  
   origen del término, 43  
 Aluminio  
   descubrimiento, 46  
 Análisis químico elemental, 49  
 Arrianos, 42  
 Átomo  
   definición, 52  
 Averroes, 35  
 Avogadro, Amadeo, 56

**B**

Berzelius, Johannes Jacob, 46  
 Boyle, Robert, 53  
 Bunsen, Robert, 69

**C**

Cannizzaro, Stanislao, 59, 62  
 Carácter metálico, 68  
 Cellini, Benvenuto, 40  
 Cesio, 69  
 Composición en peso, 49  
 Compuesto químico, 44  
 Concilio de Nicea, 42  
 Chancourtois, A.E. Béguyer de, 62  
 Chaucer, Geoffrey, 36

**D**

Dalton, John, 50  
   hipótesis atómica de, 52  
 Modelo atómico, 54  
   pesos atómicos, 54  
 Del Río, Andrés Manuel, 47  
 Demócrito de Abdera, 53  
 Descomposición  
   reacción de, 50  
 Döbereiner, Johann W., 62

**E**

Edad de piedra, 39

Elemento químico, 44

Elementos

  de Aristóteles, 38  
   representativos, 67  
 Elhúyar, Fausto de, 47  
 Eritronio, 47

**F**

Flamel, Nicolás, 42  
 Fórmula mínima, 62

Fórmulas moleculares, 61

Fórmulas químicas, 61

Frankland, Edward, 63

**G**

Gases nobles, 67  
 Gay-Lussac, Joseph L., 55

**H**

Hermes, Trismegisto, 36, 41  
 Hermes Trismegistus, 3  
 Hierro

  meteorítico, 39

*Hipótesis de Avogadro*, 58

Hoffman

  aparato de, 44

**K**

Kirchhoff, Gustav Robert, 40

**L**

Lantánidos, 67  
 Lavoisier, Antoine Laurent, 46, 50  
 Lecoq de Boisbaudran, Paul Emile, 68  
 Ley de los volúmenes en combinación,  
 55

**M**

Mechero Bunsen, 70  
 Mendeleiev, Dimitri Ivanovich, 60  
 Metales, 39  
   de la antigüedad, 39  
   Producción en Latinoamérica, 47  
   Metales alcalinos, 46, 65  
   Descubrimiento, 46  
   Metales alcalino-térreos, 65  
   Metales de transición, 67  
   Metales de transición interna, 67  
   Meteoritos, 38  
 Meyer, Julius Lothar, 62  
 Minerales, 39

Modelo atómico de Dalton, 54

Molécula

  definición, 61

**N**

Nestorianos, 42  
 Newlands, John Alexander Reina, 62  
 Nicromel, 70

**O**

Oro

  en la alquimia, 39

  en la antigüedad, 41

Ourobouros, 40

**P**

Pesos atómicos  
   de Dalton, 54  
 Porcentaje en peso, 50  
 Proporciones constantes  
   ley de las, 49  
 Proporciones múltiples  
   ley de las, 52, 54

**R**

Rubidio, 69

**S**

Sales a la llama, 69  
 Símbolos  
   de los elementos, 46  
 Síntesis  
   reacción de, 50  
 Sthal, George, 43  
 Sustancias  
   compuestas, 44  
   elementales, 44

**T**

Tabla periódica  
   descubrimiento, 62  
 Tungsteno  
   descubrimiento, 47

**V**

Valencia, 63  
 Vanadio, 47  
 Vilanova, Arnaldo de, 36  
 volumen atómico, 61  
 Volúmenes de combinación  
   Ley de, 55

# El modelo atómico nuclear

## TEMARIO

CON ESCEPTICISMO: ¿Existen los átomos? ¿Cómo son?	73
ELECTRONES, PROTONES Y NEUTRONES	74
Modelos y su utilización en ciencia	74
Rayos catódicos y electrones	75
El experimento de Thomson	78
CTS Industrial: La televisión	80
El protón	80
El neutrón	82
LA RADIOACTIVIDAD Y EL MODELO NUCLEAR DEL ÁTOMO	82
Descubrimiento de los rayos X	82
La radiactividad	83
Tipos de emisiones radiactivas	83
El experimento de Rutherford	85
El átomo nuclear	86
Número atómico y número de masa	87
Isótopos	88
TE TOCA A TI: Número y masa atómica	89
TE TOCA A TI: Núclidos, neutrones y protones	89
Resumen	89
DE FRONTERA: Electrón, protón y neutrón, ¿son elementales?	91
PROBLEMAS Y ACTIVIDADES	92
BIBLIOGRAFÍA	93



## CON ESCEPTICISMO:

### ¿Existen los átomos? ¿Cómo son?

Para Demócrito, en la época de los griegos, la idea del átomo era tan sólo una creación de la razón, un producto de la lógica humana no provisto de evidencia experimental. En esos tiempos no todos creían en la existencia de los átomos. Entre los incrédulos, Aristóteles se cuenta como el más famoso, como famosa fue su propuesta de los cuatro elementos que forman la materia: agua, aire, fuego y tierra.

La historia revela a Epicuro (341-270 a. de. n. e.), hombre moralista y bondadoso, como el último gran exponente griego del atomismo, cuyas enseñanzas fueron muy populares aún hasta la era romana. Los seguidores de Epicuro, conocidos como epicúreos, especialmente los epicúreos romanos de la última época, fueron sensuales en exceso, libertinos, aquellos que en las películas se representan como asiduos participantes en orgías y borracheras.

Tiempo después el cristianismo dominó Europa. El libertinaje, el ateísmo, la lujuria y con ellos el atomismo, se convirtieron en sinónimos de paganismo. Aproximadamente en el año 390 de. n. e. prenden fuego a la biblioteca monumental de Alejandría y con ello el atomismo desaparece por cerca de 1000 años.

Entre la idea de átomo de Demócrito y la de Dalton hay un lapso de siglos y una diferencia abismal. ¿Por qué resurge la idea del atomismo después de tanto tiempo de haber estado encubierta? ¿Qué evidencias hacían pensar que los átomos existían como la parte más pequeña de la materia? Veamos algunas.

La regularidad de las formas cristalinas llevaron a Hooke, en 1665, a deducir que éstas se deben al ordenamiento compacto de minúsculas partículas esféricas, que se apilan “como si fueran balas de cañón”. Hooke pensaba que la sal se disuelve en el agua porque el líquido no es continuo, es decir, porque posee espacios vacíos. Igualmente, cuando se mezclan un vaso de alcohol y uno de agua, se obtiene un volumen algo menor que la suma del de los dos vasos originales. Se pensaba que ello

se debía a que el alcohol se deslizaba en los huecos existentes en el agua. El olor a distancia de una carne asada o de un perfume eran una muestra más que hacía pensar acerca de la existencia de partículas que podían viajar hasta nuestro olfato. ¿Crees que se pueden utilizar estos testimonios para deducir o para estar seguro de que los átomos existen? Es decir, estos comportamientos de la materia, ¿son realmente evidencias de la presencia de átomos?

Y las leyes de las Proporciones Constantes y de las Proporciones Múltiples, a partir de las cuales se inspiró Dalton, ¿piensas que son pruebas irrefutables de la existencia de los átomos?

En 1954, Erwin Schrödinger, uno de los padres de la teoría atómica moderna, nos alerta:

*El atomismo ha sido infinitamente fructífero. Pero cuanto más se piensa en él, menos se puede evitar pensar hasta qué punto se trata de una teoría verdadera. ¿Se basa de verdad exclusivamente en el objetivo de entender el mundo real que nos rodea? Incumbe a todos, creo yo, conservar una mente muy abierta respecto a las pruebas palpables de la existencia de partículas individuales.*

¿Qué tan abierta tienen la mente ahora los científicos con respecto a la existencia o inexistencia de los átomos? ¿Cuántas veces se ha explicado un experimento cuyos resultados son completamente inesperados, con la afirmación de que lo que pasa es que los átomos no existen? La respuesta ya la sabes: en ninguna ocasión.

A diferencia de la época de los griegos y los romanos, hoy nadie piensa que los átomos no existen. Creemos tener pruebas más que suficientes de su existencia. Sin embargo, nunca hay que perder de vista que detrás de toda investigación hay un investigador, un ser humano que interpreta, dirige, selecciona, decide y deduce, dentro del contexto de lo que él mismo cree y bajo la consideración de lo que es la teoría aceptada.

Bueno, y si existen los átomos, ¿de qué están constituidos? ¿Son realmente indivisibles como lo proponía Dalton? ¿Qué hace diferente a un átomo de un elemento al del otro? ¿Tienen los átomos una estructura compleja con múltiples componentes? ¿Cuáles?

## **ELECTRONES, PROTONES Y NEUTRONES**

Los avances tecnológicos jugaron un papel muy importante para escudriñar la naturaleza y estructura del átomo de Dalton, supuestamente indivisible. De 1897 a 1932, a lo largo de 35 años, aparecieron tres partículas subatómicas: electrón, protón y neutrón. Para descubrir el electrón fue necesario aprender a manejar la energía eléctrica, la que se entendió finalmente como un flujo de electrones. En un tubo de rayos catódicos ocurrió el hallazgo de los rayos X, una forma de radiación de alta energía, el cual condujo al descubrimiento de la radiactividad y éste al modelo nuclear del átomo. Luego, mediante reacciones nucleares aparecieron el protón y el neutrón. Veamos el inicio de toda esta historia de aparatos y descubrimientos que se dio a fines del siglo XIX y principios del XX, a lo largo de la cual se plantearon diversos modelos sobre la estructura de los átomos.

### **Modelos y su utilización en ciencia**

Imagina que te interesa conocer qué hay en una habitación a la que no puedes entrar. ¿De qué manera se te ocurriría conocer lo que hay dentro, si no puedes observarlo o tocarlo?

Quizá podrías pensar en una serie de acciones indirectas para obtener información, como escuchar los sonidos que se producen en el interior, tratar de percibir algún olor, inyectar alguna sustancia o usar ondas de ultrasonido. Después de obtener esos datos quizás estuvieras en posibilidad de formarte una imagen, o un **modelo**, de los objetos que hay dentro del cuarto.

Los científicos que han tenido el interés de conocer la naturaleza de los átomos se enfrentaron con dificultades iguales o semejantes. Los átomos son tan pequeños que no pueden ser observados o tocados directamente, por lo que es necesario realizar estudios indirectos de sus manifestaciones para obtener datos que permitan construir un modelo que los describa. Así fue como se hizo a principios del siglo XX y así es como se hace aún hoy.

Una vez sentado un modelo, éste se pone a prueba al obtenerse nuevos datos experimentales. Puede ocurrir que el modelo pase la prueba y logre explicar la evidencia reciente. Pero, si no puede, lo que se busca entonces es otra nueva representación, o sea, un modelo mejor.

Una de las primeras preguntas que hizo caminar a los científicos hacia la formulación de un modelo atómico fue precisamente la periodicidad de las propiedades de los elementos en la tabla de Mendeleiev. Recuerda que él acomodó en filas (períodos) y columnas (familias) a los elementos, en orden creciente de peso atómico y de acuerdo con su valencia. Si la valencia era la que marcaba la pauta de sus combinaciones y su reactividad, ¿qué es entonces lo que determina la valencia? ¿Por qué el oxígeno se combina con dos hidrógenos y el nitrógeno con tres?

Dalton estableció en su modelo que los átomos de elementos diferentes eran a su vez distintos. Pero ¿distintos en qué, mas allá de su peso? Es más, ¿por qué su peso es distinto? Era claro que el modelo atómico de Dalton, representación de un objeto indivisible, una esfera pequeña e indestructible, comenzaba a ser insuficiente. El átomo debería tener una estructura interna que permitiera explicar el comportamiento diferente de cada elemento.

A finales del siglo XIX, los resultados de los experimentos que vamos a describir revelaron la impropiedad del modelo de átomo indivisible de Dalton. Esto motivó el desarrollo de nuevos modelos que intentaron explicar las recientes evidencias.

Los modelos nos permiten formar imágenes concretas de conceptos abstractos o de objetos minúsculos o muy lejanos para ser observados. Los científicos desarrollan modelos para explicar cosas que no pueden ver directamente. Los modelos están basados en construcciones mentales y teorías que, si son apropiadas, pueden verificar y predecir una gran cantidad de datos experimentales.

La teoría atómica es tal vez la mayor creación científica de todos los tiempos, una de las piezas maestras del pensamiento humano. Paso a paso se descubrieron las partículas que forman el átomo. Cada vez que se descubría una nueva se elaboraba un modelo de átomo más avanzado. A su vez, con cada nuevo modelo se intuía que tenía que haber partículas adicionales, las cuales se buscaban y muchas veces se encontraban. Otra vez se construían novedosos modelos, y así, hasta llegar a las teorías atómicas más modernas y complejas. A través de un camino de deducciones, experimentos, inferencias y conclusiones se va avanzando en el camino de describir algo que no se puede ver directamente.

## Rayos catódicos y electrones

Es seguro que en la antigüedad nuestros ancestros habrán sentido descargas eléctricas debidas al frotamiento entre las superficies de dos materiales, de la misma manera que a no-



**Figura 3.1**  
Los rayos son enormes descargas eléctricas.

**Figura 3.2**

Humphrey Davy (1778-1829). Descubridor de seis elementos químicos por electrólisis: sodio, potasio, magnesio, calcio, bario y estroncio. Estudió las propiedades medicinales de varios gases y propuso el empleo del óxido nitroso como anestésico. Ordenó por su conductividad a los metales, desde el mejor conductor, la plata; hasta el peor, el hierro. Hizo, en 1812, un descubrimiento técnico que evitó que el metano de las minas se incendiara con las lámparas de los mineros. También inventó la lámpara de arco.



sotros nos suceden cotidianamente fenómenos de electricidad estática al quitarnos la ropa o bajarnos de un auto. Mucho más sorprendidos quedarían después de ver los rayos de una tormenta, con la frustración de no entender qué es lo que estaba ocurriendo en el fenómeno.

Se atribuye el descubrimiento de la electricidad animal a Luigi Galvani hacia 1786, quien vio cómo se contraían los músculos de una rana muerta y colgada al entrar en contacto con dos metales diferentes.

Posteriormente, en 1800, Alessandro Volta desarrolló en Italia la primera batería que generaba corriente eléctrica a partir de una reacción química, en base precisamente a dos tipos de monedas de diferentes metales. ¿Qué tendría que ver esa electricidad con el átomo que por esa misma época propuso Dalton? Habría que esperar décadas para encontrar la respuesta.

El siglo XIX estuvo repleto de experimentos eléctricos, como la electrólisis lograda en el mismo 1800 por Nicholson y Carlisle, que luego facilitó a Davy el hallazgo de varios nuevos elementos, así como los famosos trabajos de Michael Faraday en la década de 1830.

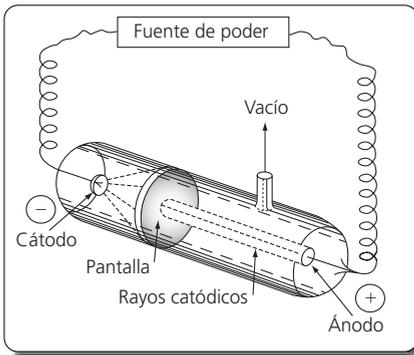
El trabajo de Faraday inspiró a Julius Plücker en la Universidad de Bonn para abandonar las matemáticas y dedicarse a la experimentación en física. Auxiliado por un soplador de vidrio excepcional —Heinrich Geissler, quien ideó la manera de evacuar hasta presiones muy bajas el gas dentro de un tubo de vidrio y sellarlo—, Plücker agregó dos electrodos metálicos a los extremos del “tubo de Geissler” para conectar el gas evacuado a una alta diferencia de potencial. Ambos observaron por primera vez un fenómeno luminoso en el interior del tubo, debido a una radiación aparentemente emitida del electrodo negativo que viajaba hacia el positivo.

Como al electrodo positivo se le llama **ánodo** y al conectado a la terminal negativa se le conoce como **cátodo**, a los rayos de Plücker se les llamó **rayos catódicos**.

**Figura 3.3**

Michael Faraday (1791-1867). Nace en Inglaterra, como uno de los 10 hijos de un modesto herrero. En 1812 se convierte en asistente del laboratorio de Humphrey Davy, donde después alcanza tanta fama como éste. Hizo importantes descubrimientos, como métodos para licuar gases, descubrió el benceno, formuló las relaciones entre la intensidad de la corriente eléctrica y la transformación que produce en una reacción química de electrólisis, trabajó en el diseño del primer generador eléctrico y sentó las bases de la teoría moderna de la electricidad. A él se le debe el concepto de “campo”.





**Figura 3.4**

Tubo de Geissler clásico, tomado de un artículo de sir William Crookes, todo un personaje en la experimentación con rayos catódicos.

En 1869, Johann Wilhelm Hittorf colocó diversos objetos al paso de los rayos catódicos y observó sus bien definidas sombras en la luminiscencia general producida por los rayos sobre el vidrio del tubo. Sin duda, los rayos viajaban en línea recta y salían del cátodo.

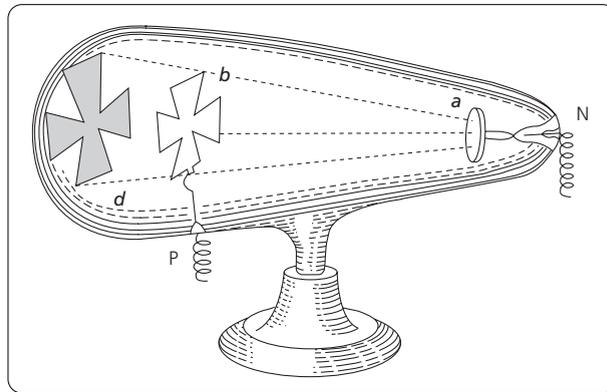
La pregunta fundamental era si esa radiación estaba formada por partículas con una carga eléctrica o eran simplemente un haz de luz. Para contestarla, William Crookes dispuso un imán cerca del tubo y notó que el haz era desviado, como se observa en la figura 3.6. Los campos eléctricos también desviaban las partículas de los rayos. Se trataba entonces de un haz de partículas cargadas y, por la trayectoria seguida ante los campos eléctricos y magnéticos, se concluyó que su carga era negativa.

Recordemos una de las reglas fundamentales del comportamiento de las partículas cargadas:

- Cargas del mismo signo se repelen entre ellas.
- Cargas de signos diferentes se atraen entre sí.

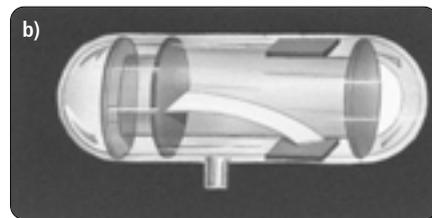
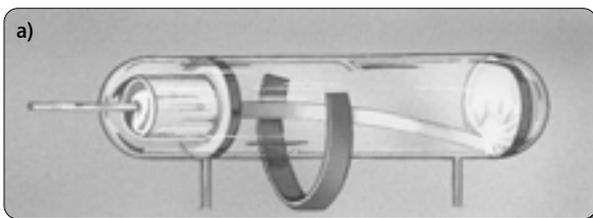
Los rayos catódicos no podían estar constituidos por las moléculas cargadas del gas remanente en el tubo, pues los cálculos indicaban que no podrían viajar distancias tan grandes sin chocar con otras moléculas del gas, desviando su trayectoria rectilínea. ¿Qué eran entonces?

Crookes era un mago con los tubos. Hizo múltiples experimentos vistosos, creando tubos con estrías luminosas, esplendores sinuosos y centelleantes chispas, que fueron los pioneros de los tubos de neón que años más tarde alumbrarían los establecimientos noc-



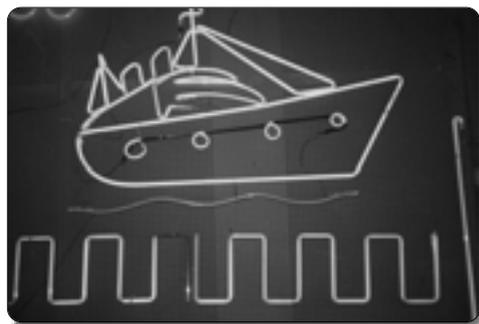
**Figura 3.5**

Tubo de rayos catódicos con un objeto en forma de una cruz de Malta. Dibujo tomado de los artículos publicados por sir William Crookes, en 1879.



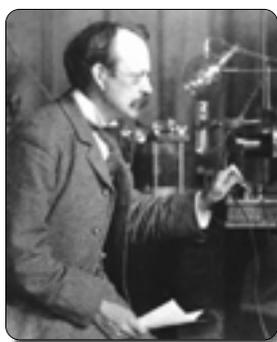
**Figura 3.6**

**a)** Tubo de rayos catódicos con un imán. No se observa bien que la trayectoria de los rayos dentro del campo magnético es circular, debido a la poca extensión del imán. **b)** Efecto de dos placas cargadas sobre la trayectoria de los rayos catódicos.



**Figura 3.7**  
Los anuncios de neón son una aplicación de los rayos catódicos.

turnos y también serían un adelanto del aparato de televisión, las pantallas de las computadoras, los osciloscopios, los electrocardiógrafos y el radar, por citar algunos ejemplos.



**Figura 3.8**  
J.J. Thomson (1856-1940), mientras trabajaba con su tubo de rayos catódicos. El descubridor del electrón, en 1897, así como de la partícula que fluía en los rayos catódicos y cuya relación carga/masa era de  $1.7588 \times 10^{11}$  C/kg.

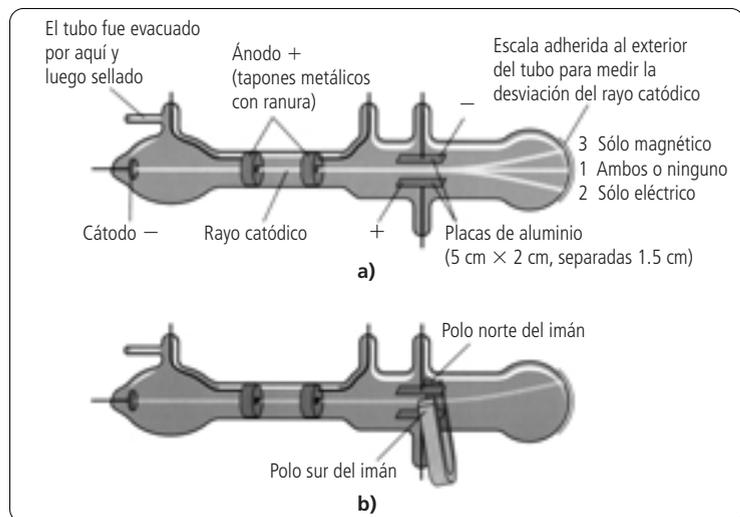
## El experimento de Thomson

A finales del siglo XIX, después del famoso hallazgo del pararrayos por Benjamin Franklin, hecho con una cometa y una llave, la electricidad era actora central en muchos experimentos, aunque todavía se desconocía su naturaleza.

En relación con los rayos catódicos, entre 1893 y 1897, al científico inglés Joseph John Thomson se le ocurrió una forma de determinar su naturaleza. Construyó un tubo de Geissler con una pantalla fluorescente al final del tubo, de tal manera que brillara al golpear sobre ella los rayos. En ausencia de interacciones, el haz se movía en línea recta, por lo que el brillo en la pantalla se producía al centro de la misma.

Joseph John colocó además un campo magnético en el interior del tubo, que provocaba que el haz de partículas se desviaran hacia otro punto de la pantalla (ver figura 3.9b). Adicionalmente, insertó un campo eléctrico formado por dos láminas metálicas cargadas, una positiva y otra negativamente, hasta obtener la disposición que se muestra en la figura 3.9a). Si sólo se conectara el campo eléctrico, las partículas del haz serían repelidas por la placa negativa superior y atraídas por la placa positiva inferior, llevando el haz hacia *abajo*.

Supongamos que el haz de rayos catódicos fuera desviado primero hacia arriba por el campo magnético. Entonces, Thomson variaba poco a poco la intensidad del campo eléctrico entre las placas, haciendo bajar paulatinamente el punto de llegada a la pantalla, hasta que el haz arribaba al centro de la misma (ver figura 3.9). En ese momento, la fuerza ejercida por el campo magnético (hacia arriba) sobre las partículas se igualaba con aquella debida al campo eléctrico (hacia abajo).



**Figura 3.9**  
Esquema del tubo de rayos catódicos de Thomson, **a)** las placas cargadas y **b)** con el imán.

Esta igualación de fuerzas permitió a Thomson escribir una ecuación de la que obtuvo el cociente de la carga,  $e$ , entre la masa,  $m$ , de las partículas de los rayos catódicos, con sólo medir la naturaleza de la trayectoria circular en el campo magnético y la magnitud de ambos campos cuando se lograba el equilibrio.

Después de experimentar con electrodos formados por distintos metales y con diversos gases en el interior del tubo, los resultados del cociente  $e/m$ , eran prácticamente constantes. El resultado actualmente conocido de  $e/m$  es:

$$e/m = 1.7588 \times 10^{11} \text{ Coulombs sobre kilogramo} \quad (3.1)$$

En ese tiempo se sabía que ese mismo cociente para el ion hidrógeno,  $H^+$ , era 1837 veces mayor:

$$(e/m)_{H^+} = 9.5724 \times 10^7 \text{ C/kg} \quad (3.2)$$

El 30 de abril de 1897, Thomson anunció confidencialmente sus resultados en una reunión de la Institución Real Inglesa:

*... el cociente de la carga a la masa de los constituyentes de los rayos catódicos es por lo menos 1000 veces mayor que el correspondiente al ion hidrógeno, el átomo más ligero conocido.*

En efecto, después del refinamiento de las mediciones, hoy sabemos que el dato de la ecuación (3.1) es 1837 veces mayor que el de la (3.2). La conclusión sorprendente es que si ambas partículas poseían la misma carga, la masa de las de los rayos catódicos era 1837 veces menor que la del ion más ligero, el  $H^+$ . Luego dichas partículas eran más ligeras que cualquier átomo, eran partículas subatómicas.

Meses más tarde, Joseph John Thomson escribía:

*No hay escapatoria a la conclusión que los rayos catódicos son cargas de electricidad negativa portadas por partículas materiales... En los rayos catódicos tenemos materia en un nuevo estado, en el cual la subdivisión de la materia va mucho más allá que en el estado gaseoso ordinario. Esos portadores eléctricos son cierto tipo de átomos primordiales a los que llamaré «corpúsculos», por brevedad.*

Por estos experimentos, a Thomson se le reconoce como el descubridor de la primera partícula subatómica, la que posteriormente recibió el nombre de **electrón**.

El electrón es una partícula subatómica que tiene carga eléctrica negativa.

Varios años después del descubrimiento del electrón, en 1911, el estadounidense Robert Millikan obtuvo el valor certero de su carga. El dato actual correspondiente es:

$$e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (3.3)$$

Si despejamos la masa del electrón de la ecuación (3.1) y sustituimos el valor de la carga de la (3.3), podemos obtener la masa de un electrón:

$$m = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad (3.4)$$

La que, comparada con la masa del protón,  $1.67265 \times 10^{-27} \text{ kg}$ , resulta ser 1837 veces menor.



## CTS Industrial: La televisión

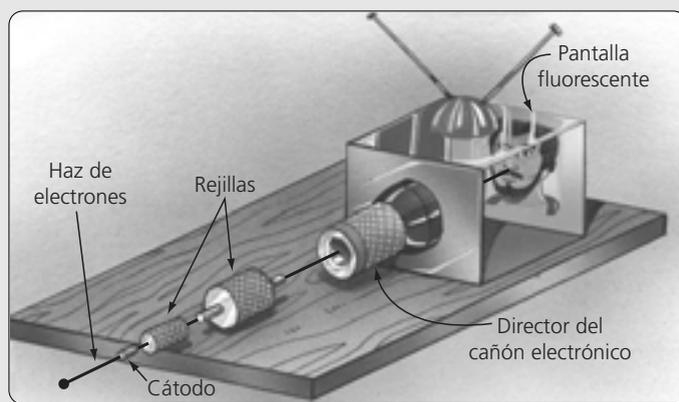
Acostumbrados a ella, la televisión ha dejado de sorprendernos como invento, pero no deja de ser una maravilla de la tecnología. Deteniéndonos a pensar, podremos darnos cuenta de que no debe ser sencillo mandar una imagen con sonido a través de continentes separados por distancias enormes.

La televisión, sabemos, es un dispositivo capaz de transmitir imágenes visuales y sonidos a distancia, a través de diversos canales de comunicación. La señal de televisión comienza con la conversión de una imagen y su sonido tomada por una cámara en un código electrónico. La señal electrónica se imprime entonces en ondas de radio de alta frecuencia para ser transmitida. Después de la transmisión, el aparato receptor, esa antena que tienes en tu casa, recibe la señal, y el aparato de televisión casero la separa y la amplifica.

La señal pasa al tubo de la imagen, que rehace la original delante de nuestros ojos. Para ello utiliza un bombardeo de electrones que chocan con una pantalla cubierta de una o más sustancias fluorescentes. De manera similar al tubo de rayos catódicos, la imagen se

forma a partir de los electrones que salen del cátodo y que son dirigidos a diferentes puntos de la pantalla. Cuando llegan muchos electrones al mismo punto, éste se ve claro. Si son pocos, se ve oscuro.

El haz de electrones cruza a lo largo de la pantalla en líneas horizontales (525 líneas por figura en América y 625 en Europa). En una fracción de segundo, el “cañón electrónico” recorre la pantalla y nos muestra una imagen fija. En la figura 3.10 se observa un diagrama del cinescopio de una televisión. El voltaje entre el cátodo y la primera rejilla es variable, y determina el número de electrones que salen del cañón en un momento dado. El director del cañón es un complicado sistema de campos eléctricos y magnéticos que logra que el haz recorra línea por línea la pantalla en un treintavo de segundo. Como la retina humana retiene lo percibido durante un décimo de segundo, y el tiempo que le toma al cañón dibujar la imagen es más corto, lo que detectamos es una animación aparentemente continua, como en el cine.

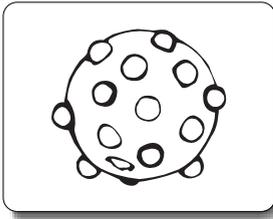


**Figura 3.10**

Cinescopio de la televisión, después de todo, un tubo de rayos catódicos.

## El protón

Los átomos no tienen una carga neta, es decir, son eléctricamente neutros. Con el descubrimiento del electrón, una partícula negativa que formaba parte de la materia, comenzó a ser evidente que tendría que haber partículas con carga positiva que también deberían formar parte del átomo.

**Figura 3.11**

Modelo atómico de Thomson. Pensó que los electrones estaban inmersos en una especie de pasta de materia con carga positiva. Su modelo se conoció como el del “panqué con pasas”.

Con esto en mente, Joseph John Thomson y William Thomson Kelvin, conocido también como “lord Kelvin”, fueron capaces de formular, en 1902, un primer modelo para el átomo de Dalton. Imaginaron el átomo como un panqué con pasas. El panqué representaba la carga positiva y contenía la mayor parte de la masa del átomo, mientras que las pasas eran los electrones, que estaban uniformemente distribuidos a lo largo del panqué, para que todo el átomo fuera eléctricamente neutro.

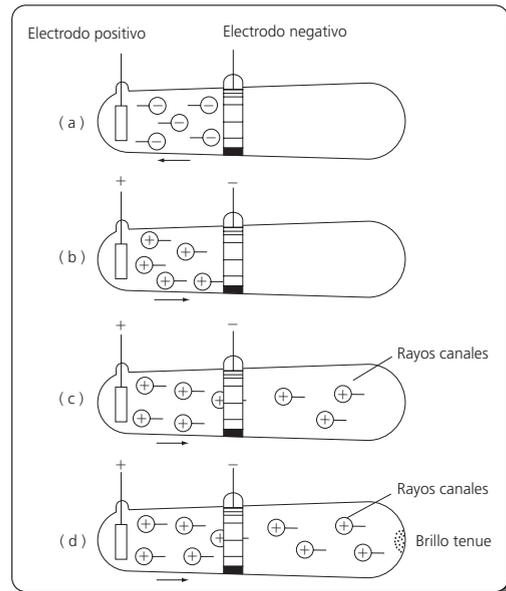
Antes de la determinación de  $e/m$ , ya se habían detectado partículas cargadas positivamente en un tubo de rayos catódicos, los llamados rayos positivos o **rayos canales**. E. Goldstein tuvo la idea genial en 1886 de colocar un cátodo horadado en uno de estos tubos. Encontró que, en la dirección contraria a los rayos catódicos, fluía una corriente de electricidad positiva (ver la explicación en la figura 3.12).

Nuestro amigo Thomson tomó nuevamente sus tubos, pero ahora para estudiar los rayos canales de la figura 3.12, a los que aplicó un sistema similar de campos eléctrico y magnético. Pudo encontrar toda una serie diferente de trayectorias, debidas a las diversas relaciones entre la carga y la masa de los iones positivos formados. Para que entendamos esto, pensemos en que el gas remanente en el tubo es  $\text{CO}_2$ . Thomson encontró trayectorias diferentes que luego pudo atribuir a los iones  $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{CO}^+$ ,  $\text{C}^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{C}^{2+}$  y  $\text{O}^{2+}$ .

Pero la cosa no quedó allí. Cuando el gas del tubo era neón es decir, un solo elemento, Thomson obtuvo de todas maneras dos trayectorias. Como si existieran átomos de neón de dos diferentes masas, una de ellas 10% mayor que la del otro. Había descubierto los **isótopos**, en 1913, lo cual fue confirmado por F. W. Aston en ese mismo año, tema que abordaremos un poco más adelante.

Años más tarde, al utilizar  $\text{H}_2$  como gas en el tubo, se formaban los iones  $\text{H}_2^+$  y  $\text{H}^+$  que, por ser los más ligeros, sufrían fuertes desviaciones al pasar por los campos eléctricos o magnéticos. Era claro que la colisión de los electrones de los rayos catódicos podía ionizar ya sea una molécula de  $\text{H}_2$  o formar iones  $\text{H}^+$ , o sea, átomos de hidrógeno desprovistos de su electrón.

Con esto formuló que los iones de hidrógeno positivos eran, de hecho, partículas subatómicas que tenían la misma carga que el electrón pero signo contrario. Hubo que esperar hasta cerca de 1920 para que el ion hidrógeno positivo fuera identificado sin lugar a dudas, denominándosele **protón**, una partícula positivamente cargada que se encuentra en todos los átomos.

**Figura 3.12**

Rayos canales. **a)** En un tubo de rayos catódicos los electrones viajan del cátodo al ánodo. **b)** En su trayectoria pueden chocar con átomos o moléculas del gas remanente en el tubo. La colisión da por resultado iones positivos, que tienden a viajar ahora hacia el electrodo negativo. **c)** Como el cátodo está horadado, algunos iones acelerados lo atraviesan, y **d)** forman los rayos canales, que se detectan en la otra pared del tubo.

El protón es una partícula subatómica positivamente cargada con una masa alrededor de 1840 veces mayor que la del electrón.

## El neutrón

En 1932, tiempo después, otro físico inglés, James Chadwick, confirmó la existencia de otra partícula subatómica de la que se tenían múltiples sospechas: el **neutrón**. Los neutrones son partículas subatómicas que no tienen carga eléctrica, y cuya masa es casi igual a la de los protones.

El neutrón es una partícula subatómica que no tiene carga eléctrica. Su masa es casi igual a la del protón.

En la tabla siguiente se presentan algunas propiedades de las tres partículas subatómicas. Es importante notar que el protón no es el gemelo positivo del electrón, debido a la enorme diferencia entre sus masas.

**Tabla 3.1**

Propiedades de las partículas subatómicas

Partícula	Símbolo	Carga eléctrica relativa	Masa relativa al protón	Masa (kg)
Electrón	e <sup>-</sup>	1-	1/1840	$9.11 \times 10^{-31}$
Protón	p <sup>+</sup>	1+	1	$1.67 \times 10^{-27}$
Neutrón	n <sup>0</sup>	0	≈1	$1.67 \times 10^{-27}$

Con esto, los ladrillos fundamentales de todos los átomos habían sido descubiertos: los electrones, los protones y los neutrones. Quedaba la pregunta de cómo acomodarlos en el átomo ¿Estarían todos juntos como una pelota hecha de pelotas?

Vale la pena aclarar que, de alguna manera, la teoría atómica de Dalton tiene validez aún: la materia está formada en efecto por átomos; los átomos de diferentes elementos son distintos entre sí; seguimos con la idea de que en una reacción química los átomos se enlazan, se separan o se reacomodan. La diferencia fundamental entre el modelo de Dalton y los modelos modernos está en la posibilidad de dividir el átomo en partes más pequeñas.



**Figura 3.13**

Wilhelm C. Röntgen (1845-1923). Descubridor de los rayos X y de su aplicación en la radiografía.

## LA RADIATIVIDAD Y EL MODELO NUCLEAR DEL ÁTOMO

La manera como los electrones se encontraban dispuestos en el interior de los átomos y de qué forma se presentaba la carga positiva en ellos constituyó una búsqueda de muchos años, que se inició con el descubrimiento de los rayos X en 1895, o sea, dos años antes de la aparición de los mismos electrones.

### Descubrimiento de los rayos X

Wilhelm Conrad Röntgen solía trabajar con rayos catódicos. Para observarlos mejor trabajaba en completa oscuridad. Al colocar un objeto metálico en la trayectoria de los rayos, el 8 de noviembre de 1895, observó que, fuera del tubo, un papel impregnado con un reactivo fosforescente brillaba misteriosamente. Este efecto no podía ser causado por los rayos catódicos, confinados al interior del tubo, ya que éstos sólo son capaces de desplazarse unos centímetros en el aire. Tenía que tratarse de un nuevo tipo de rayos, desconocidos hasta ese momento.

Röntgen llamó a este asombroso descubrimiento **rayos X**, ya que nunca pudo deducir de sus experimentos la naturaleza de dichos rayos. Ahora sabemos que no están constituidos por partículas materiales, como los rayos catódicos, sino que son una forma de radiación electromagnética de alta energía. El 28 de diciembre de 1895 entregó un manuscrito con el informe de sus resultados, que incluía una radiografía de la mano de su esposa. Röntgen recibió en 1901 el primer Premio Nobel de Física, una vez que la radiografía comercial había demostrado su enorme utilidad médica.

## La radiactividad

Pocos meses después, en 1896, el científico francés Henri Becquerel hizo un descubrimiento igualmente deslumbrante. Él estudiaba sustancias que emiten luz después de exponerlas a la luz solar. A este fenómeno se le conoce como **fosforescencia**.



**Figura 3.14**

Carátula de un reloj en la oscuridad, que muestra las agujas con un material fosforescente.

Hay sustancias luminiscentes que emiten luz visible después de ser estimuladas por luz ultravioleta u otro tipo de radiación. Si la emisión ocurre inmediatamente después de la absorción, el fenómeno se conoce como fluorescencia. Si dura un período largo se le llama fosforescencia.

Después del anuncio de Röntgen sobre los rayos X, Becquerel decidió investigar si las sustancias fosforescentes emitían rayos similares.

Trabajaba con un mineral fosforescente de uranio, al que sometía a la luz solar y colocaba luego encima de una película fotográfica protegida de la luminosidad con papel negro. Cuando reveló la placa fotográfica encontró revelada en ella la imagen del mineral. Asumió inicialmente que la fosforescencia del mineral sí producía rayos X.

Días después, Becquerel no pudo repetir el experimento debido al clima lluvioso. Encerró entonces el uranio y las placas fotográficas en un cajón durante varios días. Cuando pasaron las lluvias, reveló las placas por casualidad, antes de repetir el experimento. Aunque esperaba no encontrar nada en ellas, ya que el uranio no había sido expuesto a la luz solar, su sorpresa fue ver nuevamente la imagen del mineral de uranio en la película.

Después de muchos experimentos, una estudiante brillante de Becquerel, Marie Curie, dedujo que la radiación provenía del uranio mismo y que no tenía nada que ver con la fosforescencia. Curie concluyó que la radiación emitida por el uranio era un nuevo fenómeno, al que se conoció posteriormente como **radiactividad**. Luego encontró que todos los materiales que contenían uranio mostraban el fenómeno e identificó a otros elementos con esa característica, como el polonio y el radio, así como el radón. Becquerel, Marie Curie y su marido Pierre Curie recibieron el Premio Nobel de Física en 1903. Marie recibió en 1911 el de Química por su concienzudo y minucioso trabajo de separación en minerales con el descubrimiento de nuevos elementos radiactivos.



**Figura 3.15**

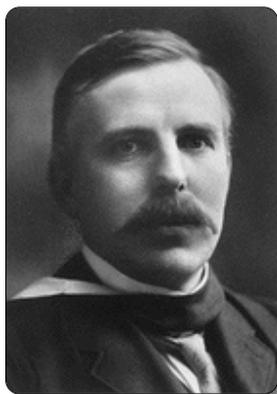
Foto de una bomba de cobalto radioactivo, utilizada para atacar las células cancerosas de tumores.

## Tipos de emisiones radiactivas

Hoy sabemos que la radiactividad es una emisión espontánea de radiación proveniente de los núcleos de los átomos.

Gracias a los experimentos de Ernest Rutherford, en 1900 se conocían tres tipos de emisiones radiactivas: radiaciones alfa, beta y gamma.

La **radiación alfa** consiste en iones del elemento helio,  $\text{He}^{2+}$  (o partículas alfa, ver figura 3.17) que se mueven a gran velocidad y que no poseen electrones. Las partículas

**Figura 3.16**

Ernest Rutherford (1871-1937). Nació en Nueva Zelanda, donde realizó incluso estudios universitarios. Es becado para estudiar en la Universidad de Cambridge, Inglaterra. Trabajó con J.J. Thomson y luego con Becquerel. Descubrió la diferente naturaleza de las tres radiaciones emitidas por los materiales radiactivos y estudió las transformaciones químicas que sucedían por la radiactividad. En 1908 fue distinguido con el Premio Nobel de Química, antes de que propusiera, en 1911, el modelo nuclear del átomo.

alfa, o núcleos de helio como luego se conocieron, se emiten aproximadamente a una velocidad de un décimo de la de la luz.

La **radiación beta** consiste en electrones emitidos a grandes velocidades, a menudo cercanas a la de la luz. Debido a su alta velocidad, éstos tienen mayor energía cinética que los electrones de los rayos catódicos.

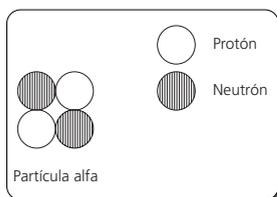
La **radiación gamma** es una forma de radiación electromagnética similar a los rayos X, pero todavía con mayor energía. Toda la radiación electromagnética, incluyendo la radiación gamma, viaja a través del espacio vacío a la velocidad de la luz, no tiene masa y no tiene carga eléctrica.

Los tres tipos de radiación se pueden distinguir por su capacidad de penetrar en la materia. Las partículas alfa tienen una penetración limitada, pues se pueden detener con un pedazo de papel o con la ropa. La radiación beta puede detenerse sólo con placas metálicas delgadas. La radiación gamma penetra mucho más, ya que se necesitan varios centímetros de plomo, o una placa gruesa de concreto para detenerla por completo.

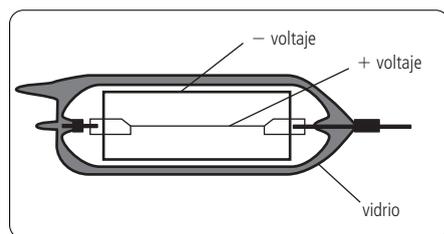
Con ayuda de Johannes Hans Wilhelm Geiger, que había inventado un aparato (el contador Geiger) para determinar la actividad de estos materiales, Rutherford concluyó en 1900 que el fenómeno ocurría mediante un decrecimiento exponencial de la actividad radiactiva. Pero ¿a qué nos referimos con una actividad que decae exponencialmente?

Se dice que una población crece de manera exponencial cuando al cabo de un cierto intervalo de tiempo se ha duplicado y, si se vuelve a esperar nuevamente ese tiempo vuelve a ocurrir la duplicación, alcanzándose cuatro veces la población original (ver la figura 3.19). De manera similar, el decrecimiento exponencial de la actividad radiactiva implica que después de cierto tiempo, conocido como tiempo de vida media, sólo queda la mitad de los núcleos radiactivos iniciales.

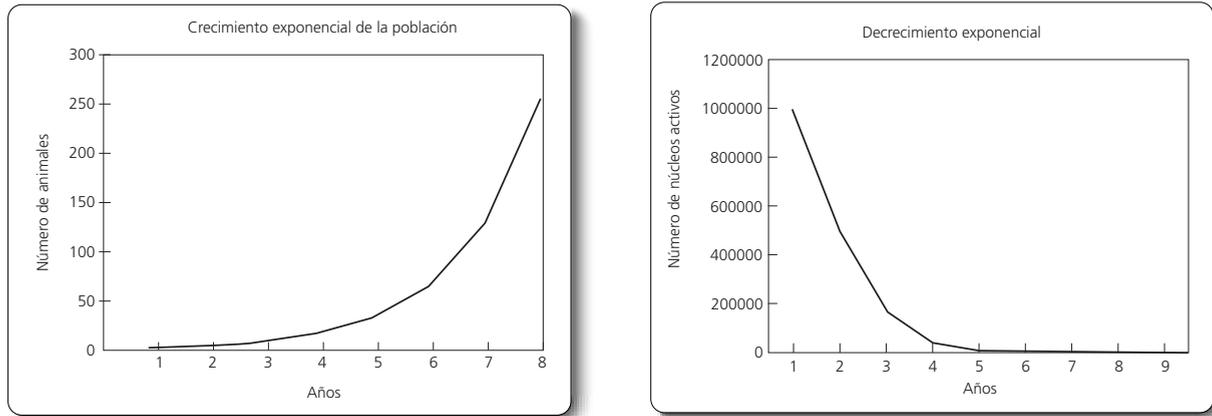
Podríamos hacer una analogía con monedas. Imagínate que tienes 128 monedas con la cara hacia arriba (átomos radiactivos). Después de lanzarlas al aire, en promedio quedarán unas 64 con la cara hacia abajo (átomos ya inactivos) y la otra mitad cara arriba. Si vuelves a tomar éstas y las lanzas, ahora serán alrededor de 32 las monedas cara arriba. Cada lanzamiento de las monedas es el equivalente a un tiempo de vida media y cada vez que ocurre se presenta una mitad menos de monedas con cara arriba (la mitad de los átomos se vuelve inactiva).

**Figura 3.17**

Esquema de una partícula alfa como la conocemos hoy, con dos protones y dos neutrones.

**Figura 3.18**

Contador Geiger. El aparato detecta la actividad de una muestra radiactiva por su efecto ionizante sobre el gas que se encuentra en el interior del tubo.


**Figura 3.19**

a) Crecimiento exponencial de la población. Si cada año se duplica el número de habitantes y ninguno muere, tendríamos una gráfica como ésta. b) Decrecimiento exponencial. Cada cierto intervalo de tiempo, la actividad de los materiales radiactivos decae a la mitad. En este caso mostramos un supuesto material radiactivo con un tiempo de vida media de un año.

## El experimento de Rutherford

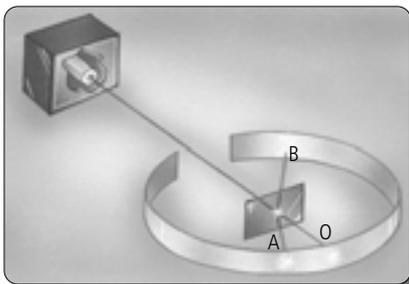
Después de tener éxito con sus trabajos sobre radiactividad, por los cuales recibió el Premio Nobel de Química en 1908, Rutherford reconoció que las partículas alfa podían utilizarse para saber más acerca del átomo. En 1909, con sus alumnos Geiger y Marsden, llevaron a cabo un experimento para poner a prueba el modelo atómico de los Thomson.

El experimento de Rutherford se muestra en la figura 3.20. Como se observa, se utilizaron partículas alfa emitidas por un elemento radiactivo para bombardear láminas delgadas de oro, platino o cobre. La fuente de partículas alfa era radio o polonio, colocado dentro de una caja de concreto. Con esto las partículas alfa solamente podrían salir por un pequeño orificio de la caja, en forma de un haz.

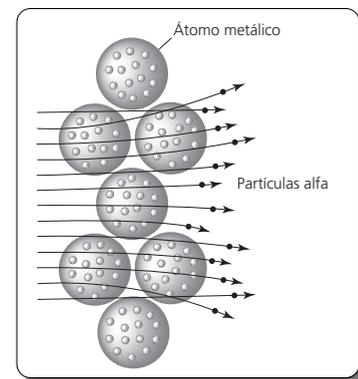
Alrededor de la placa metálica colocaron una pantalla fluorescente, para detectar las partículas alfa después de que éstas hubieran interactuado con la lámina metálica. Igual que los electrones en los rayos catódicos, las partículas alfa sólo producen una pequeña marca de luz cuando pegan sobre la pantalla fluorescente.

Lo que Rutherford esperaba observar, basándose en el modelo atómico de Thomson, era que las partículas alfa, positivamente cargadas, fueran uniformemente repelidas por las cargas positivas uniformemente distribuidas del átomo. Esto implicaba que el haz de partículas alfa pasaría por la lámina metálica con una pequeña desviación.

Lo que Rutherford encontró fue que la mayoría de las partículas alfa pasaban a través de la lámina y pegaban en la pantalla fluorescente en el punto en línea recta (O) de la figura 3.20. Algunas partículas alfa se desviaban en pequeños ángulos, marcado por el ejemplo en A, pero ligeramente desviados de la trayectoria rectilínea. El resultado sorprendente fue que algunas pocas partículas alfa se desviaban con grandes ángulos, golpeando la pantalla en puntos



**Figura 3.20**  
Experimento de Rutherford.

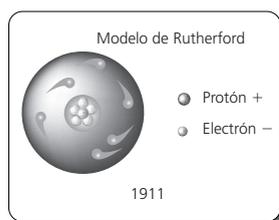


**Figura 3.22**  
Dibujo de lo que esperaba Rutherford con el átomo de Thomson.

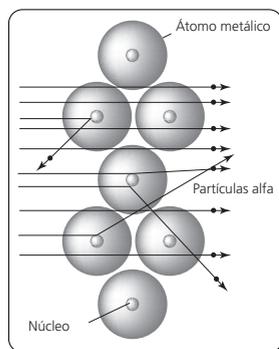
como el B en la figura. Rutherford, asustado y sorprendido por los resultados, describió su sorpresa con las siguientes palabras:

*Es tan increíble como si al disparar una granada de 15 pulgadas sobre una hoja de papel higiénico, ésta rebotara y le golpeará a uno mismo.*

## El átomo nuclear



**Figura 3.22**  
Dibujo del modelo atómico de Rutherford.



**Figura 3.23**  
Dibujo de la explicación del experimento de Rutherford utilizando su modelo atómico.

El modelo de Thomson no podía explicar el comportamiento de las partículas alfa. Rutherford pensó que la única explicación para que las partículas alfa fueran repelidas a grandes ángulos era que, en el átomo, tenía que haber un centro muy pequeño y denso de carga positiva. Este centro, llamado **núcleo**, debería contener los protones de los átomos.

Rutherford propuso que toda la carga positiva del átomo, y más del 99.9 % de su masa estaban localizados en el núcleo. Los electrones en este modelo del átomo se mueven alrededor del núcleo, como las abejas en un enjambre.

Con el modelo de Rutherford se obtuvo la explicación al experimento de las partículas alfa. La mayor parte de las partículas alfa pasaban a través de la lámina sin desviarse, dado que la carga positiva de los átomos estaba concentrada en el núcleo y podían pasar sin interactuar prácticamente con él. Algunas partículas alfa que pasaban cerca del núcleo eran ligeramente desviadas. Ocasionalmente, una partícula alfa chocaba casi frontalmente con el núcleo y entonces era fuertemente repelida.

Rutherford fue capaz de estimar el tamaño del núcleo al medir la fracción de las partículas alfa que eran desviadas y los ángulos de desviación. Su resultado sorprendente de alrededor de  $1 \times 10^{-14}$  m para el radio del núcleo contrastaba enormemente con el radio de los átomos, que se conocía como algo alrededor de  $1 \times 10^{-10}$  m. Es decir, el núcleo era 10,000 veces más pequeño que el átomo mismo, como una canica respecto a una cancha de fútbol. En efecto, la mayor parte del espacio atómico, en donde viajaban los electrones, era prácticamente espacio vacío.

Rutherford asumió que los electrones se movían a grandes velocidades alrededor del núcleo. Sin embargo, de acuerdo con las leyes de la física, los electrones en movimiento tendrían que irradiar energía, lo que les haría perder velocidad hasta finalmente colapsarse sobre el núcleo. En el capítulo 12 sabremos de los nuevos descubrimientos y teorías que permitieron resolver el dilema de Rutherford, y que nos llevarán a nuevos modelos atómicos. Repetimos que la rectificación de los modelos cuando se obtienen nuevos datos experimentales es uno de los procesos fundamentales en ciencia.

El modelo atómico de Rutherford consideraba que el átomo estaba formado por protones, en el núcleo, y electrones, a su alrededor. Sin embargo, los datos de los pesos atómicos de los elementos no se podían explicar solamente con este modelo, ya que la diferencia entre el átomo de un elemento y el del siguiente sería la presencia de un protón más en el núcleo. Sin embargo, los pesos atómicos estimados resultaban menores que los reales, por lo menos por un factor de dos.

En 1920, Rutherford propone que en el núcleo existen partículas neutras, con la misma masa que el protón lo cual, además de justificar la diferencia correcta en los pesos atómicos de los elementos, da lugar a la explicación de la existencia de isótopos, como veremos. Las partículas neutras, por no tener carga eléctrica, eran difíciles de detectar. La proposición de su existencia se dio primero por inferencia y luego se confirmó por observación directa.

En 1932, Frédéric Joliot y su esposa, Irène Joliot-Curie (ella era la hija de Pierre y Marie Curie), realizaban experimentos de bombardeo de berilio con partículas alfa. Observaron que el berilio emitía un tipo raro de radiación neutra. Cuando esta radiación interactuaba con hidrógeno se emitían protones. Ellos pensaron que la radiación era gamma,

pero James Chadwick propuso que se trataba de los anhelados neutrones, postulados durante más de una década, pero cuya existencia no había confirmada experimentalmente.

Así, el **núcleo** de los átomos está formado por protones y neutrones, tiene carga positiva y ocupa un volumen muy pequeño del átomo. La mayor parte del volumen atómico es el espacio en el que se mueven los ligeros electrones.

Dado que la densidad se define como la masa entre el volumen, una masa muy grande entre un volumen muy pequeño se traduce en una densidad muy grande; el núcleo es la parte más densa del átomo.

## Número atómico y número de masa



**Figura 3.24**

Esquema de elemento con el número atómico como subíndice a la izquierda y el número de masa como superíndice.

Las diferencias entre los átomos de diferentes elementos están en el número de protones y electrones que contienen. En la tabla 3.2 se presentan las partículas presentes en los núcleos estables de los primeros seis elementos de la tabla periódica. El nombre del elemento cambia con el número de protones en el núcleo, o **número atómico**. Así, el boro es distinto del carbono porque el primero tiene cinco protones y cinco electrones, mientras que el segundo tiene seis. Vemos, adicionalmente, que existen dos diferentes átomos de hidrógeno, al variar en ellos el número de neutrones. El número que se escribe a continuación del nombre del elemento es el llamado **número de masa**, la suma de los protones y neutrones que contiene su núcleo.

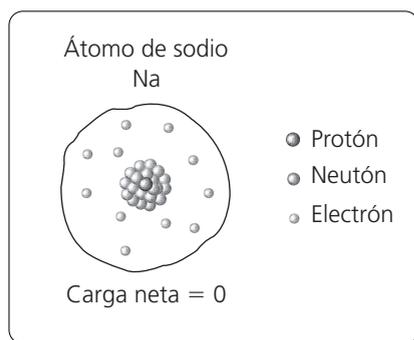
El número atómico es el número de protones que hay en el núcleo de los átomos. El número de masa es la suma del número de protones y neutrones en el núcleo.

El número atómico y el número de masa se pueden incluir a la izquierda en el símbolo de un elemento. Por convención, el número atómico se escribe abajo y el número de masa se escribe arriba, como se observa en la figura 3.24.

**Tabla 3.2**

Núcleos estables de los seis primeros elementos.

Nombre	Símbolo	Número de protones	Número de neutrones	Número de masa	Número de electrones
Hidrógeno-1	H	1	0	1	1
Hidrógeno-2	H	1	1	2	1
Helio-3	He	2	1	3	2
Helio-4	He	2	2	4	2
Litio-6	Li	3	3	6	3
Litio-7	Li	3	4	7	3
Berilio-9	Be	4	5	9	4
Boro-10	B	5	5	10	5
Boro-11	B	5	6	11	5
Carbono-12	C	6	6	12	6
Carbono-13	C	6	7	13	6



**Figura 3.24**  
Modelo atómico con neutrones en el núcleo.

Una vez descubierta la forma en que están formados los átomos, el camino natural era volver a la tabla periódica y relacionar las propiedades de los elementos con su estructura atómica.

El número de protones o número atómico marca el lugar progresivo que ocupa el elemento en la tabla periódica, la que originalmente los mantenía ordenados por su peso atómico (salvo las excepciones que tuvo que hacer Mendeleiev, quien sin conocer los números atómicos de telurio y yodo, o de cobalto y níquel, los ordenó correctamente a pesar de que el peso atómico decrecía del primero al segundo). El hidrógeno tiene un protón y va primero, le sigue el helio con 2 protones, el litio con 3 y así hasta el último elemento descubierto. De esta manera, los elementos están acomodados en la tabla periódica en orden creciente de su número atómico. Al pasar de un elemento al siguiente, el número atómico crece en una unidad.

Ahora bien, ¿por qué el ordenamiento creciente de los números atómicos coincide con el arreglo basado en la valencia hecho por Mendeleiev a lo largo de los períodos? ¿Qué factor electrónico o nuclear es el responsable de la valencia? A esto nos acercaremos en el siguiente capítulo.

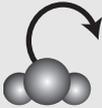
## Isótopos

Relatamos un poco más arriba el descubrimiento de los isótopos por Joseph John Thomson y luego su explicación en virtud de que poseen el mismo número atómico, pero diferente número de masa.

Los isótopos son átomos del mismo elemento, es decir con el mismo número de protones, que tienen diferente número de neutrones y, por tanto, distinto valor del número de masa y, también, diferente masa atómica.

El berilio o el flúor tienen un único isótopo estable, pero muchos elementos aparecen en la naturaleza en diversas formas isotópicas. Por ejemplo, el hidrógeno presenta dos y el estaño nueve isótopos estables.

Se conoce como **núclido** a cada núcleo con un número dado de protones y neutrones. Por ejemplo, el oxígeno-16 es un núclido con ocho protones y ocho neutrones. Hasta hoy se han descubierto aproximadamente 1500 núclidos diferentes. De éstos, sólo 264 son estables, lo que quiere decir que no emiten radiación espontáneamente. La estabilidad de los núclidos depende parcialmente de la relación entre el número de neutrones y protones en el núcleo, como se verá en el capítulo 12.



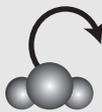
TE TOCA A TI:

### Número y masa atómica

Copia en una hoja la tabla 3.3 y llénala:

Tabla 3.3

Nombre del elemento	Símbolo	Número de protones	Número de neutrones	Número de electrones	Número atómico	Número de masa
				19		39
		27				59
			7		7	
carbono			8			
		55				133
aluminio-27	Al				13	
		29	34			
bario-80	Ba			56		
			146		76	
hidrógeno	H		2		1	
?-220				88		



TE TOCA A TI:

### Núclidos, neutrones y protones

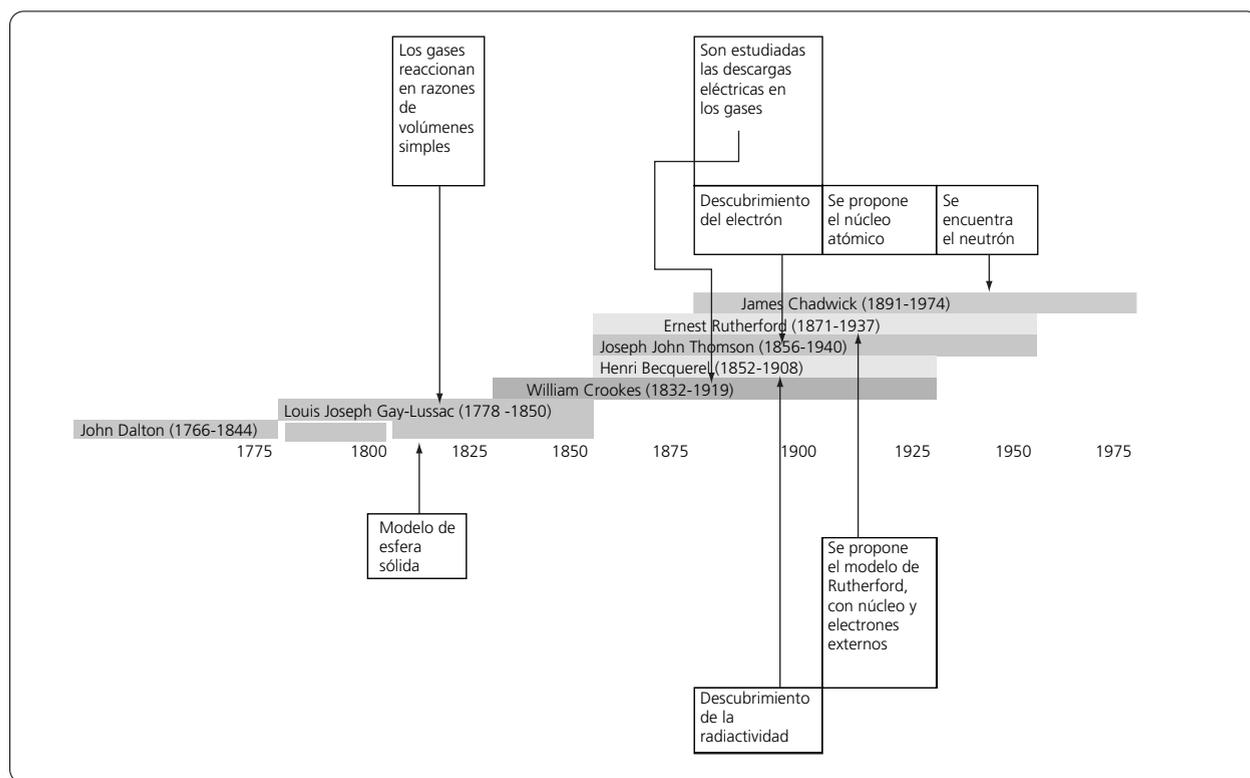
Contesta las siguientes preguntas:

- ¿Qué diferencia hay en el número atómico del paladio y el de la plata? ¿Qué sucedería si un protón de la plata se convirtiera en neutrón? ¿Y si un neutrón del paladio se convirtiera en protón?
- Busca en un libro de física nuclear qué es la emisión positrónica. Escribe un ejemplo.
- Deduces la fórmula que te permite conocer el número de neutrones a partir del número atómico y el número de masa. Calcula el número de neutrones del isótopo cobalto-60. Busca cuáles son los isótopos estables del azufre y calcula el número de protones de cada uno.
- ¿Qué le ocurre a un átomo cuando en su núcleo cambia el número de neutrones? ¿En qué se convierte? Ilustra con un ejemplo.
- ¿Qué le ocurre a un átomo cuando cambia el número de electrones? Ilústralo nuevamente con un ejemplo.
- ¿Qué partículas subatómicas son las que determinan la identidad de un elemento?

## RECAPITULACIÓN

El descubrimiento de la estructura del átomo se dio debido a una serie progresiva de ideas, experimentos y teorías llevados a cabo por un buen número de científicos. Algunos de los más importantes se presentan en la figura 3.26.

Para percibir la gran creación humana que es la teoría atómica es necesario seguir uno tras otro los pasos de cada descubrimiento y cada modelo desarrollado. Para continuar con el estudio de la química en este libro, es necesario tener perfectamente claro lo siguiente:

**Figura 3.26**

Cronología de los hechos relevantes vistos hasta aquí, en relación con la experimentación y la teoría atómica.

- Los átomos no son esferas duras e indivisibles como supuso Dalton.
- Cada átomo consiste de un núcleo cargado positivamente, que concentra la mayor parte de la masa en un espacio sumamente reducido y que está rodeado por electrones cargados negativamente.
- Un átomo es neutro debido a que el total de sus cargas negativas balancean exactamente a las positivas que existen en su núcleo.
- El núcleo contiene protones y neutrones, que son partículas con masa semejante. Los protones tienen carga positiva, mientras que los neutrones son partículas neutras.
- El número de protones se llama número atómico y le da la identidad al átomo de un elemento. De esta forma, por ejemplo, el litio tiene un número atómico igual a tres, por lo que tiene tres protones en el núcleo. Todos los núcleos con tres protones corresponden a átomos del elemento litio. Si el número atómico fuera diferente, por ejemplo cuatro, el átomo no sería de litio, sino de berilio.
- El número de masa se define como el número total de protones y neutrones que hay en un núcleo. Ese par de datos identifican a un núclido, y mientras mayor sea su número de masa también será mayor su masa.
- Cada átomo puede tener varios isótopos, estables o no. Los isótopos son átomos del mismo elemento (tienen el mismo número de protones y de electrones), con distinto número de neutrones. Esto quiere decir que tienen el mismo número atómico, pero distinto número de masa.
- La tabla periódica, como la conocemos hoy, acomoda a los elementos en grupos o familias (arreglados verticalmente) y períodos (arreglados horizontalmente). Los elementos en la tabla están acomodados en orden creciente de su número atómico. Las propiedades físicas y químicas varían periódicamente a lo largo de la tabla.



DE FRONTERA:<sup>1</sup>

## Electrón, protón y neutrón, ¿son elementales?

Para el estudio de la química, las partículas que son de más interés son electrones, neutrones y protones. Como pueden dividirse en otras partículas, decimos que los átomos no son partículas elementales, como lo suponía Dalton. Pero ¿a qué nos referimos al hablar de una partícula elemental?

Una **partícula elemental** es aquella que no está formada por otras partículas y que por tanto, no se puede dividir.

Se pensaba que el electrón, el protón y el neutrón eran partículas elementales, pero hoy sabemos que las cosas no son tan simples.

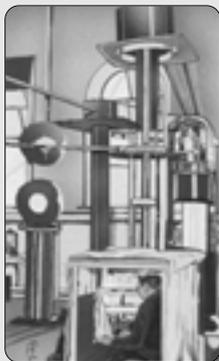
Los avances tecnológicos y el manejo de nuevas fuentes de energía más poderosas han llevado a los científicos a descubrir más y más partículas subatómicas. Para saber si una partícula es elemental o no, lo que hay que hacer es intentar romperla. Para hacerlo se necesita energía ... ¡y mucha! Se han construido diversos equipos para provocar colisiones y con ello tratar de descubrir nuevas partículas elementales. Entre los más importantes se encuentran el ciclotrón, el sincrotrón y el acelerador lineal (ver figura 3.27). Los equipos difieren en la forma en que son aceleradas las partículas que van a chocar.

Con estos equipos se descubrieron poco a poco casi 100 nuevas partículas subatómicas. Todas ellas se han clasificado en dos grandes familias: la de los **leptones**, o partículas ligeras y la de los **hadrones**, o partículas pesadas. Dentro de la primera se encuentran el electrón, el muón, el mesón tau y tres tipos de neutrinos (éstos no tienen carga ni masa, aparentemente). Los seis leptones parecen ser partículas verdaderamente elementales ya que por lo pronto no existe evidencia de que estén formadas por otras partículas más pequeñas.

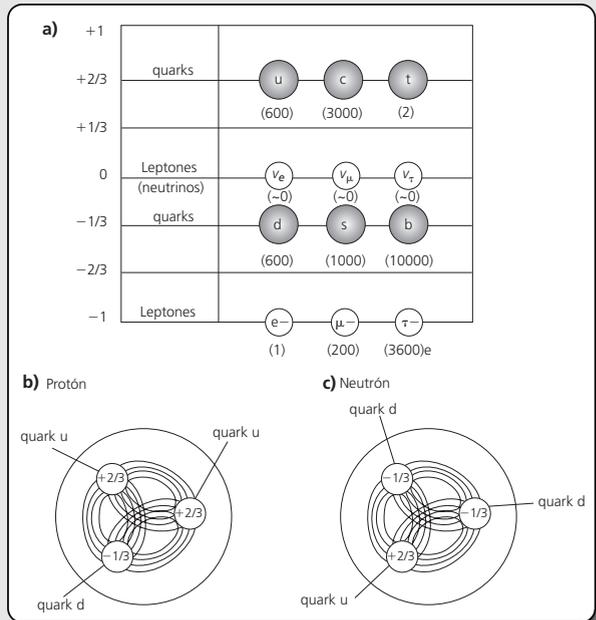
La segunda familia de partículas, la de los hadro-

nes, se caracteriza porque son influenciadas por la presencia de fuerzas nucleares fuertes, como las que mantienen al núcleo del átomo unido. Se conocen más de 100 hadrones, incluyendo al neutrón y al protón. Se ha propuesto que estas partículas no son elementales, que están formadas por unas más pequeñas, conocidas como **quarks**. Se plantea la existencia de seis quarks, los que por ahora sí se consideran partículas elementales.

La pregunta actual es si los leptones (el electrón entre ellos) o los quarks son o no partículas elementales. Así, la búsqueda de partículas verdaderamente elementales persiste, motivada por la idea de conocer la parte más pequeña que forma toda la materia. Esta búsqueda es equivalente a encontrar los orígenes de las especies, para la biología, o los orígenes de la humanidad, para la historia.



**Figura 3.27**  
Primer acelerador de partículas, que se muestra hoy en el Museo de Ciencias Británico.



**Figura 3.28**

**a)** La teoría actual de las partículas elementales, considera seis leptones y seis quarks. La carga de cada una de ellos se muestra en las ordenadas y las masas se dan entre paréntesis como masas relativas respecto al electrón. **b)** Un protón está constituido por tres quarks: dos de ellos "up", con carga +2/3 y un "down", con carga -1/3 (la suma de las tres cargas es +1). **c)** Igualmente, un neutrón está formado por tres quarks, pero ahora dos "down" y un "up", con carga total de cero.

<sup>1</sup> En la sección DE FRONTERA se presentan hallazgos científicos espectaculares y recientes, de los últimos años, con la idea de tener información lo más actualizada posible.

## PROBLEMAS Y ACTIVIDADES

1. Toma un libro de química o física. Busca en el índice la palabra “modelo”. Escoge una de las entradas y escribe en tus propias palabras de qué modelo se trata. Responde a la pregunta: ¿qué es un modelo?
2. ¿Cuáles fueron los elementos químicos descubiertos por sir Humphrey Davy mediante electrólisis?
3. Investiga las principales aportaciones de Michael Faraday al entendimiento de la electricidad y de su interacción con la materia. Consulta el libro de Carmona en la bibliografía.
4. La trayectoria de un haz de partículas cargadas al atravesar un campo magnético o por un campo eléctrico, depende de:
  - la masa de las partículas
  - la velocidad de las partículas
  - la carga eléctrica de las partículas
  - la fuerza del imán
  - la cantidad de carga de las placas del campo eléctrico

Formen equipos de cuatro personas y busquen las respuestas a cada uno de estos efectos en la bibliografía. Estas preguntas pueden servirles de guía:

- a) ¿Un haz de partículas con mayor masa se desvía más o menos que un haz de partículas más ligeras?
  - b) Cuando las partículas tienen una mayor velocidad, ¿la desviación será mayor o menor?
  - c) La relación entre la magnitud de la carga eléctrica de la partícula y la desviación provocada por un imán o por las placas cargadas ¿es inversa o directamente proporcional?
  - d) Imanes más fuertes o placas más cargadas ¿provocan una desviación mayor o menor en el haz de partículas cargadas?
  - e) ¿Cómo utilizó Thomson estos efectos para descubrir que los electrones eran partículas subatómicas cargadas negativamente?
5. La masa del ion  $^{40}\text{Ca}^{2+}$  es de  $6.636 \times 10^{-26}$  kg. Calcula el cociente de su carga entre su masa. Otro ion de un isótopo estable del calcio es el  $^{48}\text{Ca}^{2+}$ , cuya masa es de  $7.9628 \times 10^{-26}$  kg. ¿Qué esperas con respecto a la trayectoria de ambos iones cuando penetren juntos a la misma velocidad en un campo magnético?
  6. Explica por qué las masas de los átomos no son números enteros y los números de masa sí lo son.
  7. Visita algún laboratorio que tenga un espectrómetro de masas. Haz un reporte sobre el instrumento y sus aplicaciones.
  8. La carga de  $6.022 \times 10^{23}$  electrones se conoce como un Faraday o faradio. ¿Cuánto vale un Faraday expresado en Coulombs?
  9. Por lo general, se asocia a la radiactividad con un peligro. Busca 10 aplicaciones en las que este fenómeno sea más bien un beneficio para la humanidad. Consulta los libros de Brandan y Bulbulian en la bibliografía.
  10. Escribe el símbolo de los núclidos estables que se mencionan, incluidos como superíndice y subíndice el número de masa y el número atómico: nitrógeno-14, aluminio-27, plata-107, plata-109, oro-197, plomo-204 y plomo-206.
  11. Explica por qué en la tabla 3.2 el número de masa varía para cada uno de los isótopos de un elemento, pero su número atómico permanece igual.
  12. Los siguientes elementos tienen solamente un isótopo estable. Calcula y muestra en una tabla, para cada uno de ellos, el número atómico,  $Z$ , el número de neutrones,  $N$ , así como el cociente  $N/Z$ :  $^9\text{Be}$ ,  $^{19}\text{F}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{45}\text{Sc}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{141}\text{Pr}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{169}\text{Tm}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{209}\text{Bi}$ .
  13. ¿A que puede atribuirse la tendencia más o menos creciente de la relación  $N/Z$  en la tabla anterior?
  14. Haz una gráfica de  $Z$ , en las abscisas, contra  $N$ , en las ordenadas, en la que cada núclido estable del problema 12 aparezca como un punto. ¿Qué tiene que ver la gráfica obtenida con la diagonal  $N=Z$ ?
  15. Observa que los números de masa de todos los isótopos del problema 12 son números impares. Con los datos de la tabla, ¿también es un número impar el de sus protones o neutrones? Investiga a qué se debe que todos esos elementos solamente tengan un núclido estable, en relación con la naturaleza impar de sus protones y/o neutrones.

16. El tecnecio, con  $Z=43$ , y el prometio, con  $Z=61$ , son dos elementos relativamente ligeros para los cuales ninguno de sus isótopos es estable. El núclido de cada uno que tiene mayor tiempo de vida media es  $^{97}\text{Tc}$ , con 2.6 millones de años, y  $^{145}\text{Pm}$ , con 17.7 años. Con relación a este último, calcula cuanto decrece su actividad radiactiva después de un período de 177 años.
17. Elabora un pequeño trabajo sobre los quarks. Consulta los libros de Flores y Menchaca en la bibliografía.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alkins, P.W., *General Chemistry*, Scientific American Books, EUA, 1989.
- Brandan, M.E., Díaz Perches, R. y Ostrosjy, P., *La radiación al servicio de la vida*, FCE, México, 1991. (coleccion "La ciencia para todos", núm. 99).
- Bulbulian, S., *La radiactividad*, FCE, México, 1987. (coleccion "La ciencia para todos" núm. 42).
- Carmona, G. y otros, *Michael Faraday: un genio de la física experimental*, FCE, México, 1995. (coleccion "La ciencia para todos" núm. 136).
- Cruz, D., Chamizo, J.A. y Garritz, A., *Estructura atómica. Un enfoque químico*, Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, 1986.
- Devons, S., "The body electric", *The Sciences* 26-30, marzo/abril de 1997.
- Flores, J., *La gran ilusión: los quarks*, FCE, México, 1987. (coleccion "La ciencia para todos" núm. 22).
- Garritz, A. "El electrón centenario", *Educación Química* 8(3), 114-117, 1997.
- Glasstone, S., *Textbook of Physical Chemistry*, D. Van Nostrand, Nueva York, 1940.
- Herron, J.D., Frank, D.V., Sarquis, J.L., Sarquis, M., Schrader, C.L. y Kukla, D.A., *Chemistry*, Heath, Lexington, 1993.
- Hewitt, P.G., *Física conceptual*, Addison-Wesley Iberoamericana, 2a edición, Wilmington, 1995.
- Hommer, H., "Historia de la química y la tecnología. A cien años del descubrimiento de los rayos X", *Educación Química* 7(2), 72-75, 1996.
- Menchaca, A., *El discreto encanto de las partículas elementales*, FCE, México, 1988. (coleccion "La ciencia para todos" núm. 68).
- Wilbraham, A.C., Staley, D.D., Simpson, C.J. y Matta, M.S., *Chemistry*, Addison-Wesley, 3a edición, Menlo Park, 1993.

- A
- Acelerador de partículas, 91
- Alfa  
radiación y partículas, 83
- Ánodo, 77
- Aston, Francis William, 81
- B
- Bequerel, Henry, 83
- Beta  
radiación, 84
- C
- Campos  
eléctricos y magnéticos, 77
- Carlisle, Anthony, 76
- Cátodo, 77
- Ciclotrón, 91
- Cinescopio, 78
- Contador Geiger, 84
- Crookes, William, 77
- Cuarks, 91
- Curie, Marie y Pierre, 83
- Chadwick, James, 82
- D
- Dalton  
modelo atómico, 75
- Davy, Humphry, 76
- Demócrito, 73
- E
- Electricidad, 76
- Electrón  
carga del, 79  
descubrimiento del, 79  
masa del, 79  
relación  $e/m$ , 79
- Emissiones radiactivas, 81
- Epicuro, 73
- F
- Faraday, Michael, 76
- Fluorescencia, 83
- Fosforescencia, 83
- Fraklin, Benjamin, 78
- G
- Galvani, Luigi, 76
- Gamma  
radiación, 84
- Geiger, Johannes Han Wilhelm, 84
- Geissler, Heinrich, 77
- H
- Hadrones, 91
- Hidrógeno  
carga/masa del ion, 79
- Hittorf, Johann Wilhelm, 77
- Hooke, Robert, 73
- I
- Isótopos  
descubrimiento de los, 81  
número de masa  $e$ , 87
- J
- Joliot-Curie, Irène y Frédéric, 86
- K
- Kelvin, Lord, 81
- L
- Leptones, 91
- M
- Marsden, Ernest, 85
- Millikan, Robert, 79
- Modelo atómico con neutrones, 88
- Modelo atómico de Thomson, 81, 86
- Modelos  
científicos, 74
- N
- Neutrón, 82
- Nicholson, William, 76
- Núcleo  
descubrimiento del, 86  
tamaño del, 86
- Núclido, 88
- Número atómico, 87
- Número de masa, 87
- P
- Partícula elemental, 91
- Partículas subatómicas, 79
- Plücker, Julius, 76
- Polonio, 81
- Protón, 80  
masa del, 79
- R
- Radiactividad, 82
- Radio, 83
- Radiografía, 83
- Radón, 83
- Rayos canales, 81
- Rayos catódicos, 74, 75
- Rayos X  
descubrimiento, 82
- Relación carga/masa, 78
- Röntgen, Wilhelm Conrad, 82
- Rutherford, Ernest, 83  
experimento de, 85
- S
- Schrödinger, Erwin, 74
- Sincrotrón, 91
- T
- Televisión  
principios de su funcionamiento, 80
- Thomson, John, Joseph 81
- Tubo de Geissler, 77
- V
- Volta, Alessandro, 76