

## JUGANDO AL “SOLITARIO” CON LOS NAIPES DEL CREADOR. MENDELEEV Y LA TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

**Dr. Teodoro S. Kaufman**

Instituto de Química Rosario (IQUIR, CONICET-UNR) y

Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas, Universidad Nacional de Rosario

Suipacha 531, 2000 Rosario, República Argentina. E-mail: kaufman@iquir-conicet.gov.ar

*“En la tarea de preparar un libro de texto denominado Principios de Química, quise establecer una especie de sistema de cuerpos simples en el cual su distribución no estuviera guiada por el azar, como puede pensarse instintivamente, sino por una especie de principio definido y exacto... El propósito de este trabajo será alcanzado por completo si logro captar la atención de investigadores hacia las mismas relaciones en los pesos atómicos de elementos no similares que, a mi mejor saber y entender, han sido descuidadas hasta ahora de manera casi completa... en problemas de esta naturaleza está la solución a una de las cuestiones más importantes de nuestra ciencia”.*

D. I. Mendeleev. *La relación entre las propiedades y los pesos atómicos de los elementos* (1869)

*“Debe haber algún lazo de unión entre la masa y los elementos químicos y la forma en que la masa de una sustancia se expresa.... En el átomo, debe existir y ser descubierta una dependencia funcional entre las propiedades individuales de los elementos y sus pesos atómicos. Pero desde hongos hasta leyes científicas, nada puede ser descubierto sin observación y experimentación. Así es que comencé a mirar y escribí los elementos con sus pesos atómicos y sus propiedades típicas sobre cartas separadas y esto rápidamente me convenció de que las propiedades de los elementos presentan una dependencia periódica de sus pesos atómicos”.*

D. I. Mendeleev. *Principios de Química* (edición de 1905)

La “Tabla Periódica de los Elementos” de Mendeleev-Moseley, que codifica una gran cantidad de información referida a los elementos nos distingue, como químicos, de otras profesiones.<sup>1</sup> La misma, que viste las paredes de aulas, bibliotecas y laboratorios donde se produce, almacena o transmite conocimiento químico y se encuentra asociada a los más variados ámbitos y elementos relacionados con la química, es prueba de nuestra inteligencia y capacidad como civilización.

Frecuentemente se ha especulado que la Tabla Periódica de los Elementos podría constituir la base de la comunicación entre humanos y extraterrestres si alguna vez llega a producirse ese encuentro. Asumiendo que las propiedades de los elementos son las mismas en todo el universo, resulta inevitable pensar que cualquier civilización tecnológicamente avanzada

capaz de organizar viajes espaciales tendrá su propia Tabla Periódica, que invariablemente deberá contener la misma información que la nuestra.<sup>2</sup>

Dimitri Ivanovich Mendeleev, prodigioso y polifacético científico ruso de quien hace poco se cumplieran 100 años de su fallecimiento, es considerado en todo el mundo como el padre de la Tabla Periódica de los Elementos, el hombre que por primera vez entendió cabalmente el sistema periódico y formuló reglas claras y simples que permitieron clasificar de una manera lógica y sencilla el contenido de la baraja química, los naipes que representan a los elementos, ladrillos constitutivos de todo lo que existe en el universo.

El concepto de elemento era muy distinto en la antigüedad y los filósofos griegos aceptaban la idea de un elemento primigenio.<sup>3</sup> Tales de Mileto (~640-546 AC) infirió que si algunas sustancias podían convertirse en otras, probablemente todos los materiales conocidos serían meras variaciones de una materia básica, o *elemento*. Puesto que lo más abundante en la naturaleza es el agua, Tales consideró a éste el *elemento* a partir del cual estaban constituidas todas las cosas. En cambio, Anaxímenes de Mileto (~550-480 AC) consideraba que el aire era el elemento primigenio, ya que podía comprimirse formando sustancias más densas como el agua o la tierra. Heráclito de Efeso (~540-475 AC) creía que era el fuego, símbolo del cambio. Por su parte, Empédocles de Agrigento (~490-430 AC) compartía la idea de sus predecesores, pero consideraba que en lugar de uno eran cuatro los elementos precursores: el agua de Tales, el aire de Anaxímenes, el fuego de Heráclito y la tierra, añadida por él mismo. Actualmente, podríamos asemejar estos *elementos* a los estados de la materia sólido, líquido, gas y plasma.

Tal como fuera enunciado por la IUPAC en su definición minimalista, un elemento químico es una sustancia química pura cuyos átomos presentan el mismo número de protones en su núcleo.<sup>4</sup> En este sentido, la humanidad conoció nueve elementos químicos desde tiempos inmemoriales, incluyendo el oro, la plata y el cobre, al igual que el hierro y el estaño (el que aleado con cobre da lugar al bronce), mercurio, plomo, azufre y carbón, con los que se fabricaron desde adornos hasta utensilios, herramientas y armas.<sup>5</sup> Los primeros dos elementos se encuentran al estado nativo y son relativamente fáciles de extraer, mientras que la conquista tecnológica los tres siguientes se ha utilizado para demarcar hitos en la evolución histórica de la humanidad, como el paso de la edad de piedra a la del cobre (5000-3000 AC), del bronce (3000-1500 AC) y luego a la

del hierro (1500-500 AC). El conocimiento del manejo de estos metales otorgó enorme superioridad bélica a las primeras civilizaciones que los poseyeron. Durante la Edad Media se descubrieron otros tres elementos, arsénico, antimonio y bismuto, los que posiblemente deben haber incubado en algunos pensadores la cuestión de cuántos son realmente los elementos?<sup>6</sup>

La primera persona identificada como descubridor de un nuevo elemento fue Hennig Brandt (~1620-~1692).<sup>7</sup> Este comerciante de Hamburgo conocido como "el último alquimista", trataba de descubrir la piedra filosofal, un objeto mitológico cuya propiedad consistía en transformar los metales menos valiosos en oro. Brandt experimentó destilando orina hasta dar en 1669 con una sustancia sólida blanca y luminiscente, a la que llamó fósforo (del griego φως= luz, φορεω= que porta). Su hallazgo se mantuvo en secreto hasta que en 1680 el irlandés Robert Boyle (1627-1691), quien por primera vez utilizara el término "químico" en lugar de "alquimista" en su libro de 1661 *El químico escéptico*, lo redescubrió y lo hizo público.<sup>8</sup>

Antes que Brandt, en 1546 Teophrastus Bombastus von Hohenheim (1493-1591), mejor conocido como "Paracelso", obtuvo zinc durante su búsqueda de la piedra filosofal. Con frecuencia se le considera su descubridor, pero puro o en forma de aleación con el cobre (latón), el zinc ya tenía un milenio de historia de uso en joyería y manufactura de monedas en la India y en China.<sup>9</sup> Actualmente se considera que Paracelso fue el primer europeo en reconocer el zinc como un nuevo metal.

mentos (Figura 1),<sup>13</sup> los cuales en 1814 ya sumaban 47 cuando el sueco Jöns-Jacob Berzelius propuso para los mismos una nomenclatura de una o dos letras similar a la actual.<sup>14</sup> Para esa época, y teniendo en cuenta la cantidad de elementos conocidos, que en 1830 llegó a ser de 55, los científicos comenzaron a reconocer algunos patrones en su reactividad y otras propiedades, comenzando a pergeñar formas de clasificarlos, como parte del avance de la disciplina y con el objeto de entender mejor su comportamiento.

### Quién fue Dimitri I. Mendeleev? Una breve biografía

Dimitri Ivanovich Mendeleev, el menor de los 17 hijos del acomodado matrimonio de Maria Dimitrievna Korniliev e Ivan Pavolovitch Mendeleev, quien dedicaría su vida a la investigación y a la educación haciendo de ésta última su responsabilidad especial, nació en Tobolsk (Siberia, unos 800 Km al este de los Urales) de 7 de febrero de 1834.<sup>15</sup> Los Korniliev, que introdujeron la manufactura de vidrio y la imprenta e imprimieron el primer diario en la inhóspita Siberia, se habían instalado en la zona a comienzos del siglo XVII, convirtiéndose a inicios del siguiente siglo en una prominente familia siberiana. Brillante, bonita y autodidacta, Maria era la persona excepcional de la familia.

Por su parte, los Mendeleev provenían de la occidental provincia de Tver. Iván era el Director de la escuela secundaria local (Gymnasium) donde también

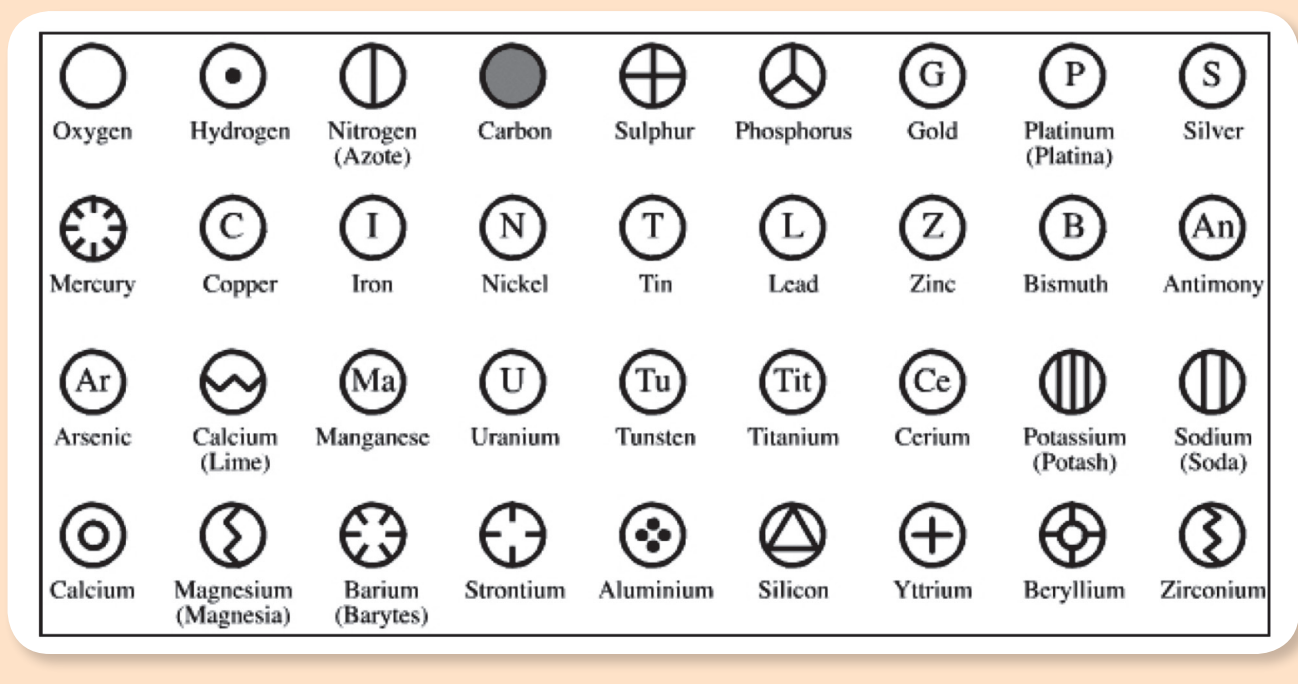


Figura 1. Nomenclatura de los 36 elementos conocidos hacia principios del siglo XIX, según John Dalton (1808).

En 1789, el químico francés Antoine Laurent de Lavoisier describió 33 elementos en su *Traité élémentaire de chimie*;<sup>10</sup> hacia 1808, John Dalton, creador del concepto de pesos atómicos<sup>11</sup> en 1803,<sup>12</sup> propuso un sistema de nomenclatura pictográfica para 36 ele-

ejercía como Profesor de lengua rusa. Hijo de Pavel Mikhailovich Sokolov, había recibido el apellido Mendeleev mientras asistía al Seminario Ortodoxo de Tver, en referencia a un vecino del mismo apellido que intercambiaba caballos y otros bienes, debido a su afición a intercambiar pequeñas piedras de un popular juego (del ruso mjenu djelatj= hacer intercambio).<sup>16,17</sup>

El año de nacimiento de Dimitri, Ivan quedó ciego

de cataratas; en 1847, a pesar de haber sido operado en Moscú con éxito parcial debió jubilarse. Ello obligó a Maria a afrontar en soledad la crianza de su numerosa prole, dada la precariedad de la humilde e inadecuada pensión que recibía. Entonces, los Mendeleev se trasladaron 30 Km al vecino pueblo de Aremziansk, donde Maria se propuso reactivar la cristalería de su hermano, la misma que fundara su abuelo. Apasionada por la educación, Maria construyó una iglesia en el pueblo y se dedicó personalmente a instruir a los obreros de su fábrica.

Al inicio de su adolescencia, Dimitri concurrió al Gymnasium de Tobolsk donde su falta de interés por latín, griego y teología, bases de la educación clásica de aquel entonces, hicieron de él un estudiante mediocre. Sin embargo, pronto resultó evidente que el joven tenía una capacidad excepcional para comprender asuntos complejos, especialmente en matemáticas y física. Consciente de ello y merced al trabajo gerencial que había obtenido en la cristalería, Maria comenzó a ahorrar con miras a darle a su hijo la educación universitaria que ella no había tenido.

Esta etapa de la vida de Mendeleev estuvo marcadamente influenciada no solamente por su madre, sino también por los químicos de la cristalería y por Timofei, su soplador de vidrio. También influyó Nicole Bessargin, el marido de su hermana Olga. Bessargin, uno de los más de cien desterrados a Siberia por el Zar Nicolás I por integrar el fracasado movimiento insurgente de Diciembre de 1825, fue quien inculcó al joven Mendeleev sus ideas liberales transmitiéndole además interés por la ciencia.

En 1848 tuvo lugar una doble tragedia en la vida de los Mendeleev. Una noche de invierno la empresa familiar de vidrio quedó consumida hasta sus cimientos por un incendio e Ivan falleció, víctima de tuberculosis. Sin capacidad para reconstruir la fábrica, con los ahorros para la educación de Dimitri como único patrimonio y con la firme decisión de educar a su hijo, Maria decidió que la familia debía abandonar Aremziansk. En 1849, luego de que el joven se graduara en Tobolsk, Maria, Dimitri y su hermana mayor Elizabeth emprendieron rumbo a Moscú, un viaje de 1600 Km.

A pesar de su importante retraso cultural a mediados del siglo XIX Rusia tenía uno de los mejores sistemas educativos del continente, con buenas universidades y un programa de becas financiadas por el estado, destinadas a los jóvenes más promisorios. Ya en la capital rusa y en medio de un convulsionado clima social, Maria procuró obtener una beca para su hijo como única alternativa para que completara su educación. Pero las aspiraciones de Dimitri se vieron frustradas, ya que el sistema universitario ruso funcionaba con pequeños cupos de admisión para las provincias y Siberia aún no había logrado obtener el suyo; por provenir de Tobolsk, a Mendeleev le hubiera correspondido asistir a la Universidad de Kazan. Imposibilitado de solicitar su ingreso a la Universidad, tras el crudo invierno y a instancias de Maria la familia se trasladó 650 Km a San Petersburgo, una floreciente ciudad sobre el Mar Báltico, considerada entonces la ventana de Rusia hacia Europa.

Las puertas de la Universidad de San Petersburgo se cerraron para Dimitri por las mismas razones que en

Moscú. Sin embargo, no sin mediar importantes sacrificios de su madre y un poco de persuasión, en 1850 Dimitri pudo dar sus exámenes en el Instituto Central de Pedagogía, gracias a los buenos oficios de Ivan Pletnov, Director del Instituto y un viejo amigo de Iván Mendeleev. Así, logró ser admitido en el programa de entrenamiento en ciencia del Instituto a los 16 y con una beca completa. El Instituto le proveía además de alojamiento, uniforme y libros a cambio de un compromiso de enseñar durante 8 años luego de recibirse. La calidad de su educación era excepcional, debido a que el Instituto compartía dependencias y algunos profesores con la Universidad de San Petersburgo, por entonces el centro académico más destacado del país.

A menos de tres meses de admitido, su madre murió a los 59, exhausta y quizás víctima de tuberculosis. Sus últimas y categóricas palabras lo marcaron "huye de las ilusiones, concéntrate en tu trabajo y no en las palabras. Busca con paciencia la verdad científica y la divina". En su libro sobre *Soluciones*, dedicado a Maria, Mendeleev escribió "esta investigación está dedicada a la memoria de una madre por su vástago más joven. Conduciendo una fábrica, lo educó con su propio trabajo. Ella instruyó con el ejemplo y corrigió con amor; con el objeto de que su hijo se dedicara a la ciencia, abandonó Siberia con él, gastando de ese modo sus últimos recursos y sus fuerzas" y sobre las últimas palabras de Maria subrayó "Dimitri Mendeleev considera sagradas las últimas palabras de una madre agonizante". Poco más tarde, en 1852, su hermana sucumbió a causa de tuberculosis, dejándolo solo.

Los estudios continuaron sin mayores inconvenientes hasta el tercer año, cuando también Dimitri enfermó. Diagnosticado de tuberculosis y sintiéndose desahuciado, durante un año entero se convirtió en una especie de mascota del Instituto, alternando entre experimentos originales que llevaba a cabo en el centro y la cama, donde registraba los resultados. Fruto de ello publicó su primer trabajo sobre el *Análisis químico de minerales de Finlandia*, siendo aún estudiante. A pesar de no concurrir a los cursos regulares, gracias a la ayuda de algunos Profesores y compañeros, logró graduarse en tiempo y forma de Maestro en Ciencia y Matemáticas en 1855. Recibió la medalla de oro a la excelencia, en calidad del mejor de su clase.

Mendeleev desarrolló su Tesis de grado sobre *El isomorfismo en relación con los otros puntos de contacto entre las formas cristalinas y la composición* (del griego  $\text{ισοξ}$ = igual y  $\text{Μορφευξ}$ = forma). En la misma abordó las relaciones entre composición química y similitud de formas cristalinas, una evidencia sobre su interés en el análisis de minerales y acerca del problema de la clasificación de sustancias. Esta Tesis, que cita a Charles Frédéric Gerhardt y a Auguste Laurent, quienes revolucionaron la química en las décadas de 1840 y 1850, demuestra tempranamente su talento para recopilar y analizar sistemáticamente grandes cantidades de datos.

Mendeleev aprendió química de Aleksandr Abramovich Voskresenskii (1809-1880), considerado el abuelo de la química rusa.<sup>18</sup> Voskresenskii había trabajado con Liebig en Alemania, y tras retornar a Rusia se había hecho conocido por sus investigaciones relacionadas con la extracción de teobromina del cacao y

trabajos con la corteza de quina, de donde obtuvo el ácido quínico, cuya oxidación le permitió obtener productos de interés en la industria de colorantes.

Con 21 años, un diagnóstico de presunta tuberculosis y un pronóstico de vida de dos años, Mendeleev solicitó su traslado en 1855 a Simferopol en la península de Crimea y 1800 Km al sur de San Petersburgo, cuyo clima más benigno le permitiría prolongar su vida. Al llegar a destino se topó con la guerra de Crimea en pleno auge y la escuela donde había obtenido trabajo como Maestro Jefe de Ciencia llevaba meses de estar cerrada. Entonces fue transferido a otra escuela en Odessa, sobre el Mar Negro y 300 Km más al norte, donde se desempeñó por un breve período enseñando matemáticas y física. Allí consiguió un permiso para utilizar la biblioteca y el laboratorio de la Universidad de Novorossisk; allí también decidió que su futuro sería la investigación científica e inició sus tareas de investigación para su Tesis de Maestrado. Para mayo de 1856 había redactado el borrador de su trabajo.

Estando en Odessa, Dimitri visitó al doctor Nicolai Pirogov, un antiguo médico del Instituto de Pedagogía quien ahora era un renombrado cirujano del ejército ruso. Tras revisarlo, Pirogov le informó que no padecía de tuberculosis sino un defecto cardíaco de tipo valvular, menor y no fatal.

Con 22 años, Mendeleev retornó a San Petersburgo para graduarse de Master en física y química en septiembre de 1856. Su Tesis de Maestrado *Estudio y teorías sobre la expansión de las sustancias por del calor*, que trata sobre volúmenes específicos, adopta el sistema de pesos atómicos de Gerhardt y Laurent, como así también la hipótesis de Avogadro (que denomina ley de Gerhardt) y muestra más claramente su interés en la clasificación de las sustancias.

Casi de inmediato, Mendeleev accedió al puesto docente ad honorem de la Universidad de San Petersburgo. Becado por el Ministerio de Instrucción Pública con el objeto de estudiar y desarrollar innovaciones tecnológicas, en abril de 1859 por consejo de su amigo el químico y compositor Alexander P. Borodin, Mendeleev inició un viaje de estudios en Europa occidental. Allí trabajó un año con el notable físico y químico Henri Regnault en París, estudiando densidades de los gases y otro año en Heidelberg con Gustav K. Kirchoff y con Robert W. Bunsen, quien recientemente había descubierto el rubidio con la ayuda del mechero homónimo.

En esta etapa, Dimitri acumuló una gran cantidad de información sobre sustancias, que luego procuraría organizar y racionalizar. Además, en Heidelberg, Bonn y París adquirió avanzados instrumentos analíticos que le permitieron más adelante en su carrera medir propiedades de las sustancias con muy buena precisión.

Aparentemente, fue durante su viaje a París donde nació el germen de lo que sería su Tabla Periódica. Mendeleev se detuvo en Wieliczka, cerca de Cracovia, Polonia, para visitar unas minas de sal. Estando en las minas surgió la pregunta que lo acosaría por un tiempo: ¿Por qué deberían verse y comportarse de manera similar el cloruro de potasio, el cloruro de sodio y el bromuro de sodio?

En Heidelberg, Dimitri procuró estudiar técnicas de

espectroscopía; sin embargo, su pobre relación con Bunsen, encargado de supervisar su trabajo, lo alejó del laboratorio de éste y Mendeleev terminó montando un pequeño laboratorio en su casa, donde con poco presupuesto dedicó su tiempo a estudiar sobre las fuerzas que sostienen juntas a las moléculas y su relación con los fenómenos capilares. Procuraba encontrar una fórmula universal para explicar la relación de la estas fuerzas de cohesión con la composición, la densidad o el peso molecular de las sustancias. Allí realizó experimentos sobre disolución de alcohol en agua, obteniendo algunos resultados que luego utilizaría para su Tesis Doctoral.

De esta investigación resultó su teoría del "punto de ebullición absoluto", anticipando un par de años el concepto de temperatura crítica (la mayor temperatura a la cual un líquido existe en equilibrio con su vapor) del irlandés Thomas Andrews (1813-1885). Aunque debido al aislamiento con que trabajaba en su laboratorio privado, sus resultados no tuvieron la difusión adecuada y perdió el reconocimiento de la primacía, Mendeleev logró explicar que los intentos frustrados de licuar gases "permanentes" como hidrógeno, oxígeno y nitrógeno se debían a que éstos no habían sido realizados por debajo de las correspondientes temperaturas críticas.

La comunidad rusa en Heidelberg era muy reducida y es probable que el novelista Ivan Turgenev haya tenido a Mendeleev en mente cuando escribió acerca de "un joven químico ruso que vivía en Heidelberg era alabado por todos los que lo conocían por su singular talento".

Hacia el final de su estadía, en septiembre de 1860 Mendeleev asistió junto a su amigo Borodin al Primer Congreso Internacional de Química en Karlsruhe, convocado por Kekulé para discutir los últimos y más significativos avances científicos, especialmente los relacionados con los pesos atómicos. En este asunto, los químicos aún no se habían puesto de acuerdo, lo que entorpecía el progreso de la disciplina. Allí tuvo acceso al trabajo del italiano Stanislao Cannizzaro (1826-1910) sobre su nuevo sistema para determinar pesos atómicos, basado en la medida de la densidad de vapores y el uso de la entonces casi desconocida hipótesis de Avogadro,<sup>19</sup> que representaba una mejora notable sobre los métodos de Gerhardt que el propio Mendeleev había utilizado. Dimitri quedó marcado por la firmeza con que Cannizzaro defendió sus puntos de vista frente a otras posiciones.

A comienzos de 1861 Mendeleev retornó a Rusia como Profesor del Instituto de Tecnología. Percatándose que el aislamiento y atraso tecnológico de Rusia también se reflejaban en la falta de un buen texto de química orgánica, alternando con la enseñanza en varias escuelas secundarias, escribió en menos de tres meses las casi 500 páginas de su primer libro, titulado *Química Orgánica*. Allí, de modo pionero, incluyó los principios de Cannizzaro para determinar los pesos atómicos.

Premonitoriamente, Dimitri declaró en su obra estar en la búsqueda de una "cierta clase de principio definido y exacto", que le permitiera la clasificación de los compuestos orgánicos, una imperiosa necesidad de los químicos del momento en vista de la marea de

resultados aparentemente inconexos que la ciencia estaba produciendo. Este objetivo sería pronto olvidado con motivo del advenimiento de la teoría estructural de compuestos orgánicos, que dio respuesta a este problema; sin embargo, el libro de texto de Mendeleev fue bien recibido en Rusia, por lo que en 1862 la Academia de Ciencias de San Petersburgo le concedió el Premio Demidov. Su trabajo de actualizar la enseñanza de la química en Rusia lo llevó también a traducir numerosos libros.

En 1863, Mendeleev se convirtió en Profesor de Química en el Instituto de Tecnología y pronto alcanzó el grado de Profesor Extraordinario de Química Técnica. Ese mismo año, luego de dos de noviazgo y ante la insistencia de su hermana Olga, se casó con Feozva Nikitchna Laschevayi, una amiga de ésta, con quien tuvo dos hijos; pero Mendeleev era un adicto al trabajo y durante sus años de casado con Feozva convivió poco con ella.

En 1865 Dimitri presentó su Tesis Doctoral sobre *Consideraciones sobre la combinación del alcohol y el agua*, donde examinaba las propiedades de los "compuestos indefinidos", que presentan propiedades físicas constantes y composición variada (como soluciones y aleaciones). La naturaleza de tales sustancias resultaba difícil de explicar en términos de la teoría atómica vigente, basada en la ley de proporciones definidas.

La liberación de los siervos rusos, decretada en 1861 por el Zar Alejandro II, obligó a muchos terratenientes a vender parte de sus propiedades y en 1865 Mendeleev compró 60 hectáreas de tierra cultivable en la provincia de Tver, a 320 km de San Petersburgo. La propiedad pronto se convirtió en residencia de Feozva, quien se mudó allí con sus hijos. Siguiendo el ejemplo de Maria, Dimitri puso en práctica un sistema humanista para los campesinos de su hacienda e introdujo métodos científicos de cultivo incluyendo el uso del análisis de suelos. En seis años, logró triplicar la producción. Su éxito atrajo la atención de sus vecinos, a quienes enseñó con pasión aconsejándolos en la fabricación de queso y ayudándolos a formar cooperativas. El enfoque de Mendeleev de aplicar conocimientos científicos para obtener beneficios prácticos no pasó desapercibido para las autoridades, que lo comisionaron para diversas misiones, incluyendo la organización del pabellón ruso en la Exposición Internacional de París de 1867.

Hacia fines de 1865 Mendeleev ya era Profesor Titular y en 1867 pasó a ocupar la Cátedra de Química General que había dejado vacante su maestro Voskresenskii, manteniendo también la propia por un tiempo. Ese año comenzó a trabajar en su gran obra *Principios de Química* que publicaría en 2 volúmenes. En 1868 con apenas 34 años, Mendeleev fue uno de los miembros fundadores de la Sociedad Química Rusa. La redacción de su libro, que le demandaría hasta 1871, lo llevó a procurar un sistema de clasificación de los elementos, que logró hacia mediados de febrero de 1869, siendo públicamente presentado en marzo del mismo año.<sup>20</sup>

Merced a la confirmación de las predicciones efectuadas con la ayuda de su Tabla Periódica, en pocos años se transformó en una persona famosa en todo el mundo (Figura 2), con doctorados honorarios de

numerosas universidades, entre ellas Göttingen, Princeton, Edinburgo, Oxford y Cambridge. En 1882, la London Chemical Society le otorgó la medalla Davy, compartida con Julius Lothar Meyer, preludio de la condecoración con la Copley medal en 1905. En 1887 estuvo en Manchester donde dio una conferencia sobre soluciones de alcohol y agua y en 1889, fue invitado a visitar Londres. Enterado allí de la enfermedad de uno de sus hijos debió abandonar la reunión y su conferencia *La ley Periódica de los elementos químicos* fue leída en la Royal Institution por el Profesor Henry E. Armstrong.

Con más de 40 años y siendo ampliamente reconocido en su país, en 1876 se enamoró de la joven Anna Ivanova Popova de 17 años, una estudiante de arte y compañera de estudios de una de las hijas de su hermana Ekaterina. Entonces, se divorció de Feozva para casarse en 1882 con Popova luego de seguirla en un viaje a Roma, convirtiéndose así técnicamente en bigamo para la ley rusa. Siendo una celebridad nacional, esta situación no pasó desapercibida, al punto que frente a las críticas el mismo Zar Alejandro llegó a comentar justificándolo "Admito que Mendeleev tiene dos esposas, pero yo tengo solamente un Mendeleev".

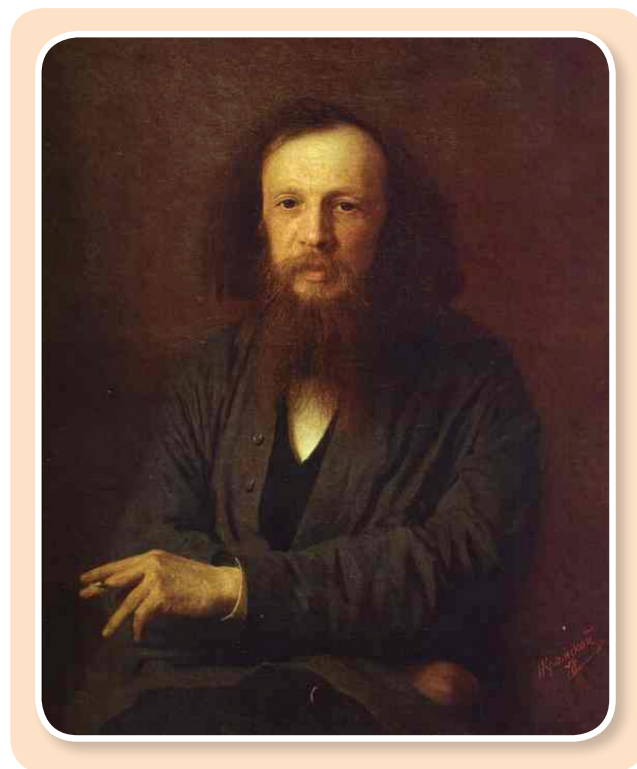


Figura 2. Mendeleev en 1878. Oleo sobre tela del Museo de la Universidad Estatal de San Petersburgo.

De su matrimonio con Popova, Mendeleev engendró cuatro hijos; con el tiempo Popova se convirtió en una artista conocida y a instancias de su mujer, Mendeleev devino en un crítico de arte y coleccionista reconocido. Por sus conocimientos y trayectoria, en 1884 fue elegido para la Academia Rusa de Artes; en contraste, la Academia Rusa de Ciencias nunca lo admitió, rechazándolo en cuatro ocasiones, lo cual fue motivo de sucesivos escándalos nacionales. Poco después de ser rechazado en 1880, la Universidad de Moscú lo

nombró miembro honorario y tras el último rechazo, varias universidades y organizaciones científicas lo nombraron miembro honorario. Refiriéndose a este tema, Mendeleev escribió al rector de la universidad de Kiev diciéndole "Os lo agradezco de todo corazón ... Comprendo que lo que está en juego es el nombre de Rusia, no el mío".

Aún antes de alcanzar la fama, Mendeleev era un científico de variados intereses. Visitó campos petrolíferos en Estados Unidos para aprender a mejorar la eficiencia de la extracción del petróleo en el sur de Rusia e inventó un nuevo método de refinado; se embarcó en proyectos de agricultura, asesorando a los campesinos y hasta realizó en 1887 un ascenso en globo aerostático para poder apreciar mejor un eclipse solar total. Sus conocimientos acerca de mezclas de alcohol y agua fueron también finalmente apreciados, cuando ayudó a fijar el estándar de la graduación alcohólica del vodka ruso. Resulta por demás interesante que Mendeleev descubrió que al mezclar alcohol y agua, el volumen de la solución resultante es menor que la suma de los volúmenes de las soluciones originales. Para arribar a la proporción ideal de alcohol y agua, Mendeleev mezcló pesos de los líquidos en lugar de volúmenes. Por ello, la unidad de comercialización del vodka en Rusia sigue siendo el gramo y no el litro.

Tras el asesinato del Zar Alejandro II en 1881, lo sucedió Alejandro III. Este designó en 1882 Ministro de Educación al conde Ivan Davidovich Delyanov, un protegido del conde Dimitri Andreyevich Tolstoy, anterior ministro de educación y flamante Ministro del Interior con quien Mendeleev había tenido algunas diferencias de opinión por sus concepciones conservadoras sobre la educación que irritaron al científico, permanentemente preocupado por la modernización de Rusia. Ante los cambios sociales sufridos por la estructura educativa desde la liberación de los esclavos, Delyanov emitió una serie de medidas restrictivas. Eliminó la autonomía universitaria, impuso cupos a las minorías y restricciones a la educación femenina, incrementó las tasas a los estudiantes, exigió el uso de uniformes y redujo el sistema de becas estatales como la que había permitido estudiarse a Mendeleev.

De ideas socialistas, apoyado por su joven esposa y comprometido con sus alumnos, frente estas modificaciones, en 1890 el científico encabezó la presentación de un petitorio estudiantil ante el Ministerio de Educación. Devuelto el petitorio sin ser leído y temiendo que su clase del 3 de abril de 1890 fuera intervenida por la policía, preocupada de que el científico iniciara y lidere una revuelta estudiantil, decidió dimitir de su cargo de Profesor. Su discurso de ese día fue "He conseguido la libertad interior. No hay nada en el mundo que tema decir. Nada ni nadie puede hacerme callar... Quiero que vosotros tengáis también este sentimiento. Es mi responsabilidad el ayudarlos para que logren esta libertad interior. Soy una persona evolucionista y pacífica. Proceded de una manera lógica y sistemática". Desde 1866 había vivido en el mismo departamento de tres ambientes adyacente a su Laboratorio de química, una costumbre de la época de la que no quiso apartarse.

Retirado de la docencia universitaria, el almirantazgo ruso le encomendó mejorar la calidad de la pólvora

sin humo, cosa que logró en menos de un año. En 1893 se le ofreció organizar y dirigir la Oficina Nacional de Pesas y Medidas, donde además de disponer la adopción nacional del sistema métrico decimal, hizo un magnífico trabajo gerencial que incluyó la incorporación de mujeres en puestos de responsabilidad. En 1899, se le encomendó trasladarse a los Urales para estudiar la industria del hierro; la actividad fructificó en un voluminoso informe.

Por su trayectoria, en 1906 quedó a tan solo un voto de ganar el Premio Nobel que había comenzado a entregarse con el nuevo siglo.<sup>21</sup> En la presentación de su nominación, el científico holandés Jacobus H. van't Hoff remarcó que "el reciente descubrimiento de los gases nobles 'elimina toda duda' acerca de lo fundamental de su logro".<sup>22</sup> Sin embargo, en esa ocasión el Comité Nobel, no conforme con el argumento del reciente descubrimiento del helio y el argón, ya que Mendeleev no había predicho la existencia de la familia de los gases nobles, como así tampoco con el descubrimiento del polonio por Marie Curie en 1898, que confirmaba una de las últimas predicciones de Mendeleev, consideró que el científico no cumplía con uno de los criterios de nominación, que establecía que sólo trabajos recientes debían ser tenidos en cuenta. Este concepto fue expresado por Svante Arrhenius, Premio Nobel de 1903, al insistir en que el sistema de Mendeleev era "demasiado antiguo como para ser considerado"<sup>23</sup> y el Premio Nobel fue concedido a Henri Moissan por su aislamiento del fluor y el desarrollo del "horno eléctrico de Moissan". No hubo otra oportunidad; Mendeleev murió afectado por una gripe complicada con neumonía el 20 de enero de 1907, a la edad de 73 años, mientras su esposa le leía un libro de Julio Verne.

### ¿Cómo arribó a su Tabla Periódica? Los naipes de Mendeleev

Es indudable que el entrenamiento y los estudios previos de Mendeleev, que incluyeron variados aspectos de clasificación, conjugados con su inclinación a buscar principios simples para lograr ordenamientos complejos y su capacidad de síntesis de la información incidieron fuertemente en el desarrollo de su enfoque clasificatorio y en sus posibilidades de éxito.<sup>24</sup> También influyó notablemente su actitud de no basarse solamente en su propio trabajo; al estilo de los científicos modernos, era habitual en Mendeleev mantener correspondencia con colegas de todo el mundo como el químico belga Jean Servais Stas, el científico francés Jean-Baptiste Dumas, el inglés Sir William Crookes, el químico sueco Kruss Nilson y Bohuslav Brauner, profesor de la Universidad de Praga. El recibía datos de sus trabajos, que luego usaría en sus investigaciones y libros. Resulta interesante que, a pesar de ello, Mendeleev permaneció ignorante del trabajo de otros colegas en relación con la clasificación de los elementos.

Sin embargo, según el propio Mendeleev, la historia de la construcción de su sistema periódico tiene un principio humilde, a mediados de la década de 1860.<sup>25</sup> Al igual que con la química orgánica en 1861, asignado a enseñar cursos de química inorgánica en la Universi-

dad de San Petersburgo, Mendeleev se dio cuenta que no contaba con bibliografía moderna. Las alternativas disponibles carecían de una estructura organizada y coherente con la cual caracterizar los elementos conocidos y sus reacciones; en consecuencia decidió redactar un libro de texto apropiado, que bajo el título de *Principles of Chemistry* comenzó a publicar en 1868 (y que aparecería en trece ediciones y traducido a varios idiomas hasta 1947).<sup>26</sup>

Mendeleev decidió inicialmente organizar su libro según familias de elementos conocidos, que presentaban propiedades similares. Dedicó de ese modo la primer parte del texto a la muy conocida química de los halógenos, continuando por la cobertura de los elementos metálicos, que decidió realizar siguiendo el orden de su poder de combinación. Así, tras los metales alcalinos, de poder de combinación unitario (litio, sodio, potasio...), se dedicó a los alcalino-térreos (berilio, magnesio, calcio...), cuyo poder de combinación es dos.

Aparentemente, para el viernes 14 de febrero de 1869, Mendeleev había terminado esta fase del trabajo y debía decidir con qué tema continuar. Durante la etapa previa, le había resultado muy difícil clasificar elementos metálicos como el cobre y el mercurio, poseedores de varios poderes de combinación, ocasionalmente uno y otras veces dos. Debía encontrar un principio subyacente que le permitiera ordenar los elementos, ya que la estructura entera del libro dependía de ello. Mientras trataba de resolver este dilema, para profundizar su propio conocimiento y así poder transferir a sus estudiantes la comprensión de los elementos, Mendeleev se propuso desarrollar ese necesario sistema de clasificación que permitiría comprender de manera sistemática las características de cada elemento y sus reacciones.

Analizada de una manera retrospectiva, esta tarea no habría podido llevarse a cabo satisfactoriamente una década antes, ya que fue recién en el Congreso de Karlsruhe de 1860 que los químicos se pusieron de acuerdo sobre la determinación de los pesos atómicos, bajo las ideas de Cannizzaro. Por otra parte, los trabajos pioneros de Döbereiner de 1817 y de los modificadores de sus tríadas durante el siguiente medio siglo generaron hacia finales de 1860 la percepción que las relaciones entre pesos atómicos de elementos análogos debían estar gobernadas por leyes simples.

Ya en 1859 el químico alemán Adolf Strecker ha-

bía puntualizado que "es difícilmente probable que las relaciones entre los pesos atómicos o los pesos equivalentes de elementos análogos sea meramente accidental. Debemos, sin embargo, dejar al futuro el descubrimiento de la ley de relaciones que aparece en estos números". Además, la acumulación de nuevo conocimiento que ocurrió durante la década de 1860, particularmente la relacionada a los elementos conocidos menos abundantes, proporcionaba más pistas acerca de la constitución del rompecabezas.

Puede considerarse, entonces, que para la época del comienzo de la investigación de Mendeleev el terreno estaba preparado, aunque el objetivo de buscar una relación entre los pesos atómicos de *todos los elementos* conocidos era completamente ajeno a las ideas vigentes, que tan solo procuraban establecer nuevas relaciones entre elementos similares.

Inmerso en la información recopilada para la redacción de su libro, Mendeleev notó la reiteración de patrones de comportamiento al relacionar las propiedades y pesos atómicos de varios elementos. Al ordenarlos, a un halógeno, le seguía un metal alcalino y luego un alcalino-térreo (Cl, K, Ca; Br, Rb, Sr; I, Cs, Ba). Este era un detalle no observado previamente y diferente de las tríadas de Döbereiner (Tabla 1), que mostraban otra serie de relaciones. Estaba presente ante sí, perfectamente ordenado, el corazón de su rompecabezas. De aquí en más, la oportuna pregunta del genio – y su respuesta – hicieron la diferencia: ¿Se repetirá este patrón para todos los elementos?

Para el día 17 de febrero por la mañana, aún no tenía la solución. Garabateó algunas de sus anotaciones sobre el dorso de una carta de Aleksei Ivanovich Chodnev, secretario de la Cooperativa Económica Voluntaria, recibida el mismo día, donde le notificaba detalles de su inminente gira de inspección por Tver y de la reunión del científico con fabricantes de queso locales. Luego probó con otros elementos además de los halógenos, como la serie del oxígeno y la del azufre... y notó el mismo tipo de tendencia.

Trabajando metódica y pacientemente durante varios años, Mendeleev había recopilado pacientemente información para cada uno de los 63 elementos conocidos. Habitado a jugar a los naipes (hebreo nabi= profeta) durante sus extensas y frecuentes travesías por el interior ruso, para resolver su acertijo y en un golpe de inspiración, Mendeleev parece haber establecido una conexión entre su problema de clasifica-

Relaciones entre elementos								Solitario de naipes.											
Pesos atómicos crecientes →								Orden numérico descendente →											
G r u p o s	Cl	Br	I	F= 19	Cl= 35	Br= 80	I= 127	<b>p</b>	♣	K	Q	J	10	9	8	7	6	5	...
	K	Rb	Cs	O= 16	S= 32	Se= 79	Te= 128	<b>a</b>	♦	K	Q	J	10	9	8	7	6	5	...
	Ca	Sr	Ba	N= 14	P= 31	As= 75	Sb= 122	<b>l</b>	♥	K	Q	J	10	9	8	7	6	5	...
									<b>s</b>	♠	K	Q	J	10	9	8	7	6	5

**Tabla 1.** Patrones de comportamiento de los elementos, observados por Mendeleev. Izquierda: A cada halógeno de la primer fila le sigue un metal alcalino y luego un alcalino-térreo. Centro: Relación entre algunos elementos y sus pesos atómicos. Salvo por el caso del telurio y el yodo, se observa un patrón de comportamiento, en progresión creciente hacia arriba y a la derecha. Derecha: Distribución de naipes en el juego del solitario.

ción química y su pasatiempo o favorito, el solitario. En este juego, las cartas debían alinearse clasificándose de acuerdo con los palos y en orden numérico descendente (Tabla 1).

Si bien intuía que su clasificación debía ser efectuada listando los elementos en grupos de propiedades similares, desconocía cuáles serían los “palos químicos”, por lo que decidió consignar los datos de los elementos incluyendo puntos de fusión, densidades, colores, pesos atómicos, valencias, forma de los cristales de sus sales y energías de enlace, sobre tarjetas individuales.

En este punto, el sabio ruso debió hacer frente a un tremendo desafío teórico, ya que los elementos tenían muchas características importantes (color, densidad, conductividad, ductilidad, maleabilidad, punto de fusión, afinidad para reaccionar con varios reactivos), cualquiera de las cuales podría formar la base de un sistema clasificatorio.

Mezcla de intuición y análisis, Mendeleev decidió centrar su atención en hallar tendencias en las características de valencia, isomorfismo, volúmenes específicos y peso atómico, dejando de lado todas las otras propiedades. Fuertemente influenciado por Cannizzaro, el peso atómico era un concepto familiar para Mendeleev, pero la valencia y el isomorfismo, si bien eran términos conocidos, no contaban aún con buenas bases teóricas que permitieran su comprensión. Valencia es el término referido a la capacidad de combinación de un elemento (peso atómico = peso equivalente  $\times$  valencia);<sup>27</sup> por su parte, los elementos son isomorfos cuando las familias de las sales que los contienen presentan una estructura cristalina similar.

Como con los naipes de la baraja, Mendeleev había organizado inicialmente sus tarjetas según su peso atómico, lo que le dio un ordenamiento unidimensional que no le reveló ninguna información útil. Procuró entonces acomodar sus tarjetas según un criterio adicional, con el objeto de detectar patrones regulares de comportamiento, enfocándose sobre la valencia y el isomorfismo. Más de una vez las había clavado contra la pared sólo para observar la tabla resultante y volver a reordenarlas para detenerse y contemplar el nuevo patrón. Utilizando nuestro conocimiento actual, esta etapa que permitió obtener una segunda dimensión para su trabajo, convirtiendo el mismo de una línea en una Tabla, consistió en seccionar metódicamente su secuencia unidimensional de elementos, procurando desentrañar lógicamente el principio y el fin de cada período.

Cuando los elementos fueron colocados correctamente, según se dice tras un sueño<sup>28</sup> producto de la fatiga, el 17 de febrero de 1869<sup>29</sup> tuvo ante sus ojos la que sería su contribución más importante a la química. Originalmente, denominó a su ordenamiento bidimensional *Sistema Periódico*, porque en las funciones periódicas hay un patrón de comportamiento que se repite con una determinada frecuencia. Mendeleev pudo observar una dependencia periódica de las características de los elementos con su peso atómico, como así correlaciones horizontales, verticales y diagonales muy superiores a las detectadas en las tríadas ya conocidas. Este principio, que Mendeleev llamó *Ley Periódica*, fue enunciado diciendo que “las propiedades de los elementos son función periódica

de sus pesos atómicos” o que “cuando los elementos se organizan en orden creciente de sus masas atómicas, algunos conjuntos de propiedades se repiten periódicamente”.

Estando obligado por una visita de tres días en gira de asesoramiento por las granjas en la provincia de Tversk para inspeccionar unas fábricas de queso, su descubrimiento se hizo público en la quinta reunión de la recientemente creada Sociedad Química Rusa a través del Profesor Nikolai A. Menshutkin. Fue el 6 de marzo de 1869, durante una presentación formal bajo el título de *La dependencia entre las propiedades y los pesos atómicos de los elementos*.

En su parte más importante, el trabajo de Mendeleev contiene una Tabla (Tabla 2) que presenta la clasificación de los 63 elementos conocidos hasta ese entonces, ordenados por peso atómico en “grupos” (litio, sodio, potasio, rubidio y cesio) ubicados horizontalmente. Mendeleev resumió los detalles más sobresalientes de su propuesta en ocho puntos fundamentales.<sup>30</sup>

Una vez ordenados según sus pesos atómicos, los elementos exhiben una aparente periodicidad en sus propiedades.

Elementos con propiedades químicas similares presentan pesos atómicos similares (platino, iridio, osmio) o que se incrementan regularmente (potasio, rubidio, cesio).

El ordenamiento de los elementos o grupos de elementos según sus pesos atómicos corresponde a sus llamadas valencias, tanto como a sus propiedades químicas distintivas, lo cual es claramente evidente en el grupo Li, Be, B, C, N, O, F y se repite en otros.

Los elementos más difundidos presentan pesos atómicos pequeños. Hidrógeno es el más liviano.

La magnitud del peso atómico determina el carácter del elemento (S y Te; Cl y I), pero así como hay semejanzas hay claras diferencias.

Debe esperarse el descubrimiento de elementos desconocidos, análogos al aluminio y silicio, con pesos atómicos entre 65 y 75.

El peso atómico de un elemento puede ser corregido en función del de los elementos contiguos; así el peso atómico del telurio debe estar entre 123 y 126 y no puede ser 128.

Pueden predecirse ciertas propiedades de los elementos a partir de sus pesos atómicos.

Su Sistema Periódico (Tabla 2), o como lo llamó, un *Ensayo de sistematización de los elementos sobre la base de sus pesos atómicos y de sus semejanzas químicas*, vio la luz en el volumen inaugural de la revista oficial de la novel sociedad científica, en ese entonces una publicación virtualmente desconocida, siendo un resumen del mismo con la Tabla y los ocho comentarios sobre la misma rápidamente re-publicado el mismo año en el reputado *Zeitschrift für Chemie* alemán.<sup>31</sup>

Si hubiera estado presente Mendeleev, posiblemente habría tenido lugar una sesión de preguntas y respuestas a continuación de la presentación, para que su autor aclarara puntos oscuros a la audiencia, pero la mera lectura del artículo por parte del Profesor Menshutkin, quien no alcanzaba a comprender completamente el trabajo, no provocó particular interés y no hubo discusión.

Entre los asistentes a la presentación de la Tabla se encontraba Fëdor Nicolaievich Savchenkov (1831-1900), quien en 1867 había traducido la edición inglesa de 1865 del texto *Un curso de Química Práctica* de William Odling. Se ha especulado que, de haber estado presente en la sesión, muy probablemente Mendeleev habría sido interpelado por su colega Savchenkov para hacerle saber que Odling había hecho público un trabajo muy similar al suyo cuatro años antes. En esa circunstancia, la alegría de la primacía del descubrimiento le habría durado a Mendeleev desde el 17 de febrero al 6 de marzo.

Mendeleev recibió copia de la Tabla de Odling el 3 de abril de 1869, haciendo mención del hecho en una nota al pie de su publicación.

La Ley Periódica, producto de haber organizado los elementos de acuerdo a su peso atómico y luego agruparlos en columnas en virtud de sus propiedades químicas, es uno de los principios básicos de la química. La misma representó el resultado de un conjunto de generalizaciones y hechos establecidos que se acumularon hacia fines de la década de 1860, que tomaron cuerpo en una expresión razonablemente sistemática y general.

Si bien la Tabla original presentaba varios errores, como posiciones equivocadas para mercurio y oro, como para talio y plomo, Mendeleev procuró minimizar discordancias y en varios casos se vio forzado a invertir la ubicación de pares de elementos con el objeto de lograr consistencia química, fundamentalmente debido a la inexactitud de los valores disponibles de peso atómico. Por ejemplo, debió colocar el telurio

antes que el yodo, porque las propiedades del primer grupo se parecen más a las del azufre y selenio en cuyo grupo fue clasificado, que a las del fluor, el cloro y el bromo, con quienes más congenia el comportamiento del yodo.

En el caso del berilio, su peso molecular fue calculado de manera incorrecta por un error en la valencia que se le atribuía, por lo que el berilio debería haber estado entre el nitrógeno y el carbono. Sin embargo, siendo su comportamiento semejante al del magnesio, Mendeleev argumentó que no había espacio para el berilio entre el nitrógeno y el carbono, sugirió que su valencia debía ser 2, propuso un diferente peso molecular y lo colocó en el grupo del magnesio, para ocupar adecuadamente el espacio vacío entre litio y boro. Una situación similar se dio entre uranio e indio.

Puesto que su sistema periódico no fue inicialmente aceptado por sus colegas, particularmente los europeos, Mendeleev lo mejoró durante los siguientes dos años haciendo diferentes correcciones y en la edición de 1870 de sus *Principios de Química* incluyó una tabla mejorada, bajo en título de *Sistema natural de los elementos*.

En 1870 Mendeleev fue un paso más allá, dejando perpleja a la aún incrédula comunidad científica. A la predicción de la existencia varios nuevos elementos que ocuparían los lugares dejados en blanco en su *Sistema Periódico* de 1869, le sumó la anticipación de las propiedades de algunos de ellos. Para ello, se basó en la estructura teórica lograda y en las tendencias químicas codificadas en la propia Tabla.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180 (Hafnio)
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
			Ni = Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68 (Eka-aluminio)	Ur = 116 (uranio)	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70 (Eka-silicio)	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
		? = 45 (Eka-boro)	Ce = 92		
		Er = 56?	La = 94		
		Yt = 60?	Di = 95 (didimio)		
		In = 75,6?	Th = 118?		

**Tabla 2.** El Sistema Periódico de Mendeleev. Distribución de los 63 elementos conocidos en 1869. Preve la existencia de varios elementos desconocidos, entre los que se hallan los de pesos atómicos 45, 68 y 70. Provisoriamente, los mismos fueron conocidos como eka-boro, eka-aluminio y eka-silicio hasta su descubrimiento. El elemento didimio resultó ser una mezcla de varios elementos. El elemento cuya existencia y peso atómico 180 señaló es el hafnio; su existencia fue presumida en 1895 por el químico danés Julius Thomsen (1826-1909) sobre la base de la Tabla Periódica, siendo aislado en Dinamarca recién en 1922 por Dirk Costey y György Karl von Hevesy. En la Tabla Periódica de 1871, Mendeleev cambia de opinión y asigna la ubicación a la que correspondería al hafnio (debajo del titanio y el zirconio) al lantano. El peso atómico aceptado para el lantano (138,90) es el promedio entre 94 y 180. Resulta evidente que a pesar de haber sido descubierto en 1839, Mendeleev tenía el dato equivocado del peso atómico del lantano, uno de los pocos elementos que no aparece en la Tabla Periódica de Meyer. Uranio actualmente se designa como "U".

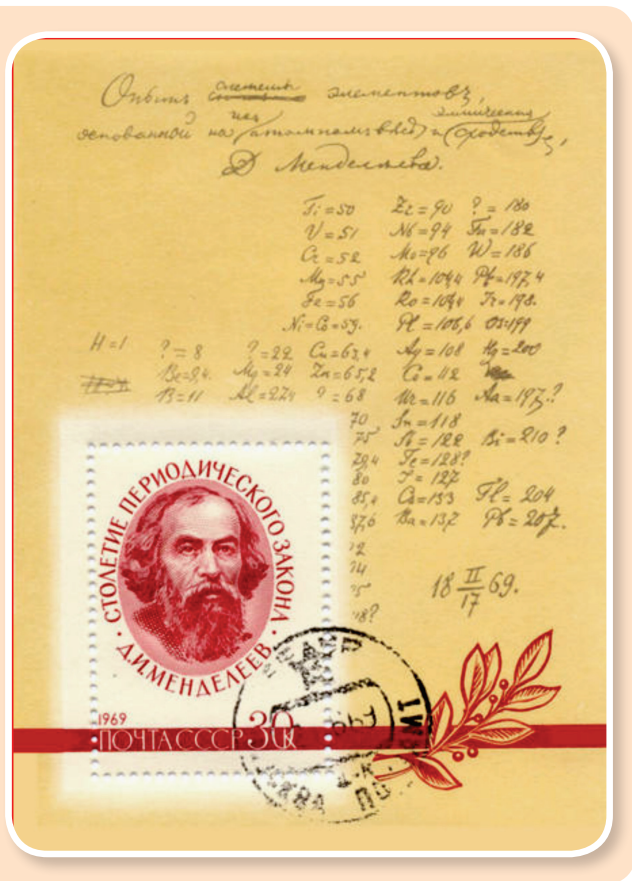


Figura 3. Tarjeta y sello postal ruso de 1969, conmemorativo del centenario de la Tabla Periódica de Mendeleev, con la imagen del científico ruso. Sobre el fondo exhibe copia de una de las versiones originales de la Tabla Periódica, manuscrita por Mendeleev. Como símbolo de un logro, la tarjeta presenta una cinta y una rama de olivo en la parte inferior.

En 1871 Mendeleev presentó una nueva modificación de su clasificación, a la cual denominó *Tabla Periódica* (Tabla 3). En la misma, los grupos se encuentran dispuestos de manera vertical y varios elementos presentan disposición diferente con respecto a la original. Por ejemplo, berilio y magnesio se hallan más cerca de la tríada calcio, estroncio y bario; del mismo modo, mercurio y oro se encuentran dispuestos debajo de cadmio y plata, respectivamente.<sup>32</sup>

Tres de los elementos originalmente predichos [Eka-silicio (germanio), Eka-aluminio (galio) y Eka-boro (escandio)], fueron descubiertos en los siguientes 16 años. Su comportamiento químico resultó correctamente anticipado (Tabla 4) por Mendeleev, lo cual le proporcionó un fuerte impulso y gran reconocimiento, mientras que otros dos debieron aguardar 50 años hasta ser descubiertos; un par adicional fue descubierto más adelante aún y otros tres elementos predichos (pesos atómicos 45, 146 y 175) no tienen existencia.

El galio fue descubierto por el francés Emile Lecoq de Boisbaudran en 1875. Basado en sus predicciones, Mendeleev fue capaz de sugerir a su descubridor que el valor hallado de la densidad del mismo estaba equivocado. Esta confianza, bordeando la arrogancia, se demostró justificada una vez que la densidad del galio fue correctamente determinada sobre una muestra purificada del elemento.

A diferencia de otros autores que presentaron trabajos similares en la misma época, el enfoque de Mendeleev resultó exitoso porque éste entendió cabalmente el potencial de su trabajo. Sabiamente dejó espacios para nuevos elementos, los que podrían agregarse sin perturbar la periodicidad de propiedades. Además, le permitió aseverar que los pesos atómicos conocidos podrían estar incorrectos, haciendo lugar a

	Grupo I R <sub>2</sub> O	Grupo II RO	Grupo III R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Grupo IV RO <sub>2</sub>	Grupo V R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Grupo VI RO <sub>3</sub>	Grupo VII R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Grupo VIII RO <sub>4</sub>
1	H= 1							
2	Li= 7	Be= 9,4	B= 11	C= 12	N= 14	O= 16	F= 19	
3	Na= 23	Mg= 24	Al= 27,3	Si= 28	P= 31	S= 32	Cl= 35,5	
4	K= 39	Ca= 40	?= 44	Ti= 48	V= 51	Cr= 52	Mn= 55	Fe= 56, Co= 59, Ni= 59, Cu= 63
5	(Cu= 63)	Zn= 65	?= 68	?= 72	As= 75	Se= 78	Br= 80	
6	Rb= 85	Sr= 87	?Yt= 88	Zr= 90	Nb= 94	Mo= 96	?= 100	Ru= 104, Rh= 104 Pd= 106, Ag= 108
7	(Ag= 108)	Cd= 112	In= 113	Sm= 118	Sb= 122	Te= 125	I= 127	
8	Cs= 133	Ba= 137	?Di= 138	?Ce= 140	-	-	-	----
9	(-)	-	-	-	-	-	-	
10	-	-	?Er= 178	?La= 180	Ta= 182	W= 184	-	Os= 195, Ir= 197, Pt= 198, Au= 199
11	(Au= 199)	Hg= 200	Tl= 204	Pb= 207	Bi= 208	-	-	
12	-	-	-	Th= 231	-	U= 240	-	----

**Tabla 3.** Tabla Periódica de Mendeleev de 1871, con la clasificación de los elementos en ocho grupos. El encabezado de la Tabla consigna además la fórmula prevista para el óxido. Dispone los períodos de manera horizontal, como lo hace Lothar Meyer en su Tabla de 1870. Permite que calcio, estroncio y bario se encuentren más cerca del magnesio, cuyo comportamiento es similar, pero presenta dificultades con la distribución de los elementos de transición, que Meyer coloca en tres grupos, separados de los elementos representativos. Cambia a 240 el peso atómico del uranio y su posición, acercándolo al torio y refina las predicciones de peso atómico para eka-boro, eka-aluminio y eka-silicio. Confirma el peso atómico del berilio en 9,4 y sugiere nuevos pesos atómicos para cerio e itrio. El elemento cuyo peso atómico predicho es 100 es tecnecio, producido artificialmente por primera vez en el laboratorio en Italia, por Emilio Segre y Carlo Perrier en 1937.

Propiedad o Atributo	Predicho	Hallado	Predicho	Hallado	Predicho	Hallado
	Eka-aluminio (1871)	Galio (Ga) (1875)	Eka-boro (1871)	Escandio (Sc) (1879)	Eka-silicio (1871)	Germanio (Ge) (1886)
Peso Atómico	68	69,9	44	44,95	72	72,59
Peso específico	6,0	5,96	3,0	3,0	5,5	5,47
Volumen atómico	11,5	11,7			13,0	13,2
Fórmula y punto de ebullición del cloruro					EaCl <sub>4</sub> <100°C	GeCl <sub>4</sub> 86°C
Punto de fusión	Bajo	29,8	No volátil	1539°C	Alto	958°C
Descubrimiento y apariencia	Por su espectro	Por su espectro	No por su espectro. Duro	No por su espectro. Duro	Metálico. Gris oscuro	Metálico. Gris claro
Fórmula del óxido	Ea <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ea <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	EaO <sub>2</sub>	GeO <sub>2</sub>
Densidad del óxido y sus propiedades	5,5. Soluble en ácidos y álcalis	5,88. Soluble en ácidos y álcalis	3,5. No volátil	3,86. Punto de fusión= 2300°C	4,7. Alto punto de fusión	4,7. Punto de fusión= 1100°C

**Tabla 4.** Algunas predicciones de Mendeleev. El 29 de noviembre de 1870, Mendeleev dio a conocer sus predicciones sobre las propiedades de eka-boro, eka-aluminio y eka-silicio. En 1871, Mendeleev dejó 37 espacios vacíos en su Tabla y anticipó los pesos atómicos de 9 elementos entonces desconocidos. Siete de los mismos fueron descubiertos [eka-boro (escandio, 1879), eka-aluminio (galio, 1875), eka-silicio (germanio, 1886), dwi-cesio (francio, 1939), eka-tantalo (protoactinio, 1917), eka-manganeso (tecnecio, 1937) y tri-manganeso (renio, 1925)] y los restantes dos [eka-cesio (175), eka-niobio (146) no tienen existencia real]. Más adelante realizó otras predicciones, como la del eka-telurio, identificado como polonio por los esposos Pierre y Marie Curie.

posibles variaciones en el orden de los pesos atómicos. Finalmente, y a diferencia de otros colegas, Mendeleev uso su Tabla como herramienta para predecir la existencia de algunos elementos faltantes.

Los logros teóricos de Mendeleev se pasan por alto a veces debido a la suspicacia que la Tabla Periódica es simplemente un dispositivo de clasificación. Sin embargo, ésta es actualmente una de las piedras angulares de la química, encerrando la sistemática y lógica de la composición de los elementos del universo.

Un ejemplo de una tendencia explicada por Mendeleev usando su sistema involucra los óxidos de los elementos principales de cada grupo (columna). Mendeleev demostró que la cantidad de oxígeno en los óxidos es una función periódica del grupo en su Tabla Periódica. Los elementos del grupo I (alcalinos) forman óxidos con la estructura R<sub>2</sub>O, donde R es el símbolo genérico del elemento. Los elementos del grupo II (alcalino-térreos) forman óxidos como R<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (RO) y así sucesivamente hasta los halógenos, cuyo óxido asume la forma R<sub>2</sub>O<sub>n</sub>. Sin aplicar la ley periódica, este conocimiento habría seguido siendo misterioso. Aunque dar cuenta de esta tendencia no proporcionó el conocimiento causal o mecanístico sobre la formación de los óxidos, permitió ciertamente que Mendeleev pudiera explicar la diferente reactividad de ciertos metales.

Sin embargo, la Tabla en la versión de Mendeleev no es perfecta, ya que no ofrece lugar a los isótopos, descubiertos en el siglo XX. Además, sus versiones iniciales no incluían a los gases nobles, desconocidos en ese momento; éstos fueron agregados a fines del siglo XIX por Sir William Ramsey, contribuyendo inicialmente al asombro y luego al mayor prestigio de Mendeleev.

La incorporación de los gases nobles a la tabla periódica de los elementos pudo efectuarse sin alterar el concepto básico de periodicidad enunciado por el científico ruso y dando un sentido más cierto al nú-

mero 8 de Newlands.

**(Endnotes)**

**Referencias bibliográficas y notas:**

1. Emsley, J. (2001). Nature's Building Blocks. pp. 521-522. Oxford University Press, Oxford, Reino Unido.
2. Bainbridge, W. S. (1994). Extraterrestrial Intelligence: Communication. En: The Encyclopedia of Language and Linguistics, Asher, R. E. (Ed.), Volume 3, pp. 1200-1203, Pergamon, Oxford, Reino Unido.
3. Laertius, D. (2006). Thales, en The Lives and Opinions of Eminent Philosophers. Yonge, C. D. (traductor), Kessinger Publishing, LLC, Whitefish, EUA.
4. McNaught, A. D.; Wilkinson, A. (1997). Compendium of Chemical Terminology. IUPAC, Blackwell, Nueva York, EUA.
5. Leever, T. H. (2001). Transforming Matter: A History of Chemistry from Alchemy to the Buckyball. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, EUA.
6. Morris, R. (2003). The Last Sorcerers: Path From Alchemy To The Periodic Table. John Henry Press, Washington, EUA.
7. Emsley, J. (2000). The Shocking History of Phosphorus, Macmillan, Londres, Reino Unido.
8. Fulton, J. F. (1961). A Bibliography of the Honourable Robert Boyle, Fellow of the Royal Society. 2da Ed. Clarendon Press, Oxford, Reino Unido.
9. Webster, J. (1978). Metallographia or a History of Me-

tals. University of Minnesota, Minnesota, EUA.

10. Siegfried, R. (1982). Lavoisier's Table of Simple Substances: Its Origin and Interpretation. *Ambix* 29, 29–48.

11. Aunque de uso indistinto, actualmente se prefiere el término "masa atómica" en lugar de "peso atómico".

12. Hall, M. B. (1968). The History of the Concept of Element. John Dalton and the Progress of Science 21–39.

13. Las Figuras 1-3 fueron tomadas de Internet.

14. Melhado, E. M. (1981). Jacob Berzelius, the Emergence of his Chemical System, Stockholm, Sweden: Almqvist & Wiksell International. University of Wisconsin Press, Madison, Wisconsin, EUA.

15. Posin, D.Q. (1948). Mendeleev, The Story of a Great Chemist. Whittlesey House, Nueva York, EUA.

16. Harrow, B. (1927). Eminent Chemists of our Time, 2da Ed., pp. 18-40 y 273-285. Van Nostrand, Nueva York, EUA.

17. Archivo Mendeleev. *Materiales Autobiográficos* (1951). Universidad de Leningrado. Vol. 1, p. 11.

18. Pisarzhevskii, O. (1954). Dmitry Ivanovich Mendeleev: His Life and Work.

19. Chalmers, A. (2009). The Scientist's Atom and the Philosopher's Stone en Boston Studies in the Philosophy of Science 279. pp. 199-213, Springer, Heidelberg.

20. van Spronsen, J. W. (1969). The Periodic System of Chemical Elements: A History of the First Hundred Years. Elsevier, Amsterdam, Holanda.

21. Friedman, R. M. (2001). The Politics of Excellence: Behind the Nobel Prize in Science. pp. 32-34. Times Books, Nueva York, EUA.

22. Blokh, A. M. (2002). *Priroda* 2, 72 (Moscú, Rusia).

23. Kauffman, G. B. (2001). The Nobel Centennial 1901-2001. *Chem. Educ.* 6, 370-384.

24. Kaji, M. (2003). Mendeleev's Discovery of the Periodic Law: The Origin and the Reception. *Found. Chem.* 5, 189–214.

25. Cahn, R. M. (2002). Historische und Philosophische Aspekte des Periodensystem der Chemischen Elemente. Hyle Publications, Karlsruhe, Alemania.

26. Gordin, M. (2004). A Well-Ordered Thing: Dmitrii Mendeleev and the Shadow of the Periodic Table. Basic Books, Nueva York.

27. Puede definirse "peso equivalente" como la masa de una sustancia capaz de proveer o reaccionar con un mol de H<sup>+</sup> en una reacción ácido-base o proveer o reaccionar con un mol de electrones en una reacción redox. A diferencia del "peso atómico", que es adimensional, el peso equivalente se expresa en unidades de masa.

28. Strathern, P. (2001). Mendeleev's Dream: The Quest For the Elements. St. Martins Press, Nueva York, EUA.

29. Kedrov, B. M. (2001). Den' odnogo Velikogo Otkrytia. Izd. Sotsial'no-ekonomicheskoi Literatury. Editorial URSS, Moscú, Rusia.

30. ensaude-Vincent, B. (1986). Mendeleev's Periodic System of Chemical Elements. *Br. J. Hist. Sci.* 19, 3–17.

31. Mendeleev, D. I.; Jensen, W. B. (2005). Mendeleev on the Periodic Law: Selected Writings, 1869 - 1905. Dover, Mineola, EUA.

32. Laing, M. (2007). *The Periodic Tables of Mendeleev. Educ. Chem.* 57-59.