

Artículo invitado

LA TABLA PERIÓDICA COMO RECURSO IMPRESCINDIBLE PARA EL APRENDIZAJE Y LA DIVULGACIÓN DE LAS CIENCIAS

Gabriel Pinto Cañón

E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, España. Reales Sociedades Españolas de Física y de Química.

E-mail: gabriel.pinto@upm.es

INTRODUCCIÓN

En diciembre de 2017 la *Asamblea General de Naciones Unidas* proclamó 2019 como *Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos* (UNESCO, 2018). La idea surgió del profesor y popular divulgador británico Martyn Polyakoff (de madre inglesa y padre ruso), que se la transmitió a Natalia P. Tarasova, presidenta entonces de la *Unión Internacional de Química Pura y Aplicada* (IUPAC). El objetivo era conmemorar el 150º aniversario de la propuesta de ordenación de los elementos conocidos entonces, en forma de tabla, por el ruso Dimitri Ivánovich Mendeléiev (1834–1907). También se puede hablar de sesquicentenario, según el prefijo “sesqui”, que denota una unidad y media, usado para formular ciertos compuestos como algunos óxidos. Con la efeméride se pretendía reconocer la relevancia de las ciencias básicas en el desarrollo sostenible y en la solución de problemas globales (energía, educación, agricultura, salud...). Desde la IUPAC se ha señalado que también coincide con el 100º aniversario de su fundación (IUPAC 2019).

La historia de la construcción de la tabla periódica (TP) es un ejemplo de imbricación de distintas ciencias y tecnologías, con aportaciones multidisciplinares, en lo que actualmente podríamos calificar como STEAM (*Science, Technology, Engineering, Art and Mathematics*). Se trata de una obra colectiva, realizada con el esfuerzo de multitud de personas de distintos países y generaciones. Es un caso de desarrollo científico donde docentes, alumnos y editoriales, tanto de educación secundaria como universitaria, han desempeñado una importante labor. También es un icono cultural de nuestro tiempo: prácticamente cualquier persona con estudios secundarios recuerda, aunque sea vagamente, su figura e interpretación.

A lo largo de 2019 se ha reflexionado mucho sobre la TP en foros diversos, y se han realizado multitud de actividades y publicaciones. En

concreto, el autor de este trabajo ha intervenido en un buen número de talleres formativos, ferias científicas, conferencias, concursos y seminarios para profesores, sobre el tema. Fruto de la labor desarrollada al respecto y de su experiencia docente, tanto como profesor de Química de primer curso universitario para ingenieros, como en formación del profesorado, propone en este artículo algunas ideas que le parece pueden ser de interés, tanto para la didáctica del tema en las distintas etapas educativas, como para su divulgación entre público no especializado. En cada caso, los profesores deberían amoldar lo aquí expuesto al nivel de sus alumnos para su práctica docente y tomarlo como una posible inspiración para su quehacer.

Tras presentar algunas aportaciones sobre la evolución del concepto de elemento químico, se detallan aspectos de la historia del desarrollo de la TP, así como ciertas formas de representarla. Se comparten también ideas sobre la interpretación (consecuencia de la mecánica cuántica) de la TP moderna, sobre si está concluida o no, y sobre su propio diseño como fuente de inspiración creativa.

EVOLUCIÓN DEL CONCEPTO DE ELEMENTO QUÍMICO

La noción de elemento químico es un aspecto central de la química y para comprender tanto la utilidad como el significado de la TP. Se considera que su discusión histórica (Asimov, 1985, Aragón, 2004) es un recurso relevante para el aprendizaje y la divulgación de las ciencias en general y de la química en particular. Para la filosofía griega clásica, los cuerpos estarían compuestos por cuatro constituyentes fundamentales (agua, aire, tierra y fuego), que serían soportes de cualidades (calor-frío y seco-húmedo), en distinta proporción. A ellos se añadió un "quinto elemento" muy sutil, el éter, formador de la esfera celeste, que aún se rememora en la actualidad cuando se habla de la "quintaesencia" como "lo más puro, fino y acendrado de una cosa", según la definición de la Real Academia Española (RAE) (2019). También se usa aún a veces la expresión "líquido elemento", desde como alusión poética al agua (en realidad un compuesto, no elemento, desde el punto de vista químico). Un ejemplo para ilustrar y explicar estas ideas es el conocido fresco "La escuela de Atenas" (ver Figura 1), realizado entre 1510 y 1512 por el pintor renacentista italiano Rafael Sanzio (1483-1520), que se encuentra en las estancias de Rafael del Palacio Apostólico del Vaticano. Fácilmente accesible en internet, recoge a los filósofos y científicos más importantes de la época clásica, con rostros de personajes contemporáneos al artista (como Miguel Ángel para Heráclito, Leonardo da Vinci para Platón, y él mismo representando a Apeles, un pintor del siglo IV a.C.). En el fresco aparece el médico y filósofo cordobés Averroes (1126-1198), que defendió la filosofía de Aristóteles (384 a. C.-322 a.

C.) y facilitó la continuidad del pensamiento griego y el florecimiento de la alquimia en la Europa medieval. Con este tipo de herramientas educativas se puede transmitir cómo la ciencia es parte de la cultura y cómo el interés por el conocimiento sobre la constitución de la materia estaba presente ya en la antigüedad. También es un ejemplo de cómo se podrían promover acciones comunes entre el profesorado de diversas materias (ciencias, filosofía, historia, arte...). Clasificaciones análogas sobre los constituyentes últimos de la materia forman parte también de la tradición de las grandes culturas asiáticas.



Figura 1. Ilustración para comentar la importancia del pensamiento griego clásico sobre los elementos constitutivos de la materia, a través del fresco *La scuola di Atene*, por Rafael.

La alquimia, una práctica compleja con multitud de matices y precursora de la química moderna, se practicó en diversas civilizaciones durante más de dos mil años y, en Europa, hasta el siglo XVIII. Se ha generalizado una imagen de los alquimistas como "charlatanes" que elaboraban pócimas engañosas y dedicaban casi todos sus esfuerzos a la búsqueda de la piedra filosofal que transformaría el plomo y otros metales en oro o plata, y del elixir de la vida que garantizaría la inmortalidad. No obstante, muchos eran personas inteligentes, laboriosas y bienintencionadas, que estudiaban la naturaleza y descubrieron técnicas que aún se usan y nuevas sustancias (como algunos de los actuales elementos químicos). Por su lenguaje hermético y su práctica secretista, con una simbología destinada solo a los iniciados, avanzó lentamente. Los siete metales conocidos se asociaban (como los días de la semana) a los siete planetas y sus símbolos correspondientes: oro-Sol, plata-Luna, hierro-Marte, mercurio-Mercurio, estaño-Júpiter, cobre-Venus y plomo-Saturno. La simbología utilizada, que se recoge en multitud de imágenes, como la Figura

En el siglo XVI, el alquimista y médico suizo Paracelso (1493–1541) propuso que había tres “principios fundamentales” (sal, mercurio y azufre) que hoy en día se pueden entender como propiedades (solidez, fluidez y combustibilidad, respectivamente), más que como ingredientes fundamentales de la materia. Al depositarse sobre los *cuatro elementos* clásicos conferirían las propiedades de cada sustancia. Además, con esa *tria prima*, usada por muchos alquimistas, se hacía referencia al cuerpo, al alma (conciencia) y al espíritu (principio vital), respectivamente. Se recurría así, como anteriormente se vio con el 7, a otro número “mágico” especial, el 3 (propio de la santísima trinidad). Paracelso fue el pseudónimo que eligió para sí mismo Theophrastus Bombast von Hohenheim, por considerarse “semejante a Celso” (médico romano del siglo I). Tuvo mucha fama porque se pensaba que consiguió la “transmutación” del plomo en oro. Destacó como precursor de la toxicología, donde es conocida su sentencia “*dosis sola facit venenum*” (la dosis hace al veneno), y de la farmacología moderna (a través de la iatroquímica, rama científica que unió química y medicina). Pero fue un personaje controvertido; afirmó haber creado, a partir de una mezcla de carbón, mercurio y pelos de humano, que se enterrada en estiércol de caballo, un *homúnculo* o criatura de unos 30 centímetros de altura, que huía de su creador, por lo que no lo pudieron ver otras personas.

El anglo-irlandés Robert Boyle (1627–1691) estableció que la materia está formada por “ciertos cuerpos primitivos y simples” que no tienen por qué ser solo tres o cuatro y que componen los “cuerpos mixtos”. En su obra *The Sceptical Chymist* (1661) propone que el “cuerpo simple” es una sustancia que no puede “reducirse” a otra más sencilla. Además, plantea más dudas que afirmaciones y anima a la experimentación frente a la mera elucubración o planteamientos propios de la antigüedad. Considerado uno de los fundadores de la química moderna, aparte de estudiar aspectos como la compresibilidad de los gases y ser un gran teólogo, es de quien parte la idea del concepto actual de elemento químico, a través de su teoría corpuscularista. En la Figura 3 se muestra su retrato y la portada del libro citado, donde se aprecia el estilo, a modo de resumen, de los títulos de los textos de la época.

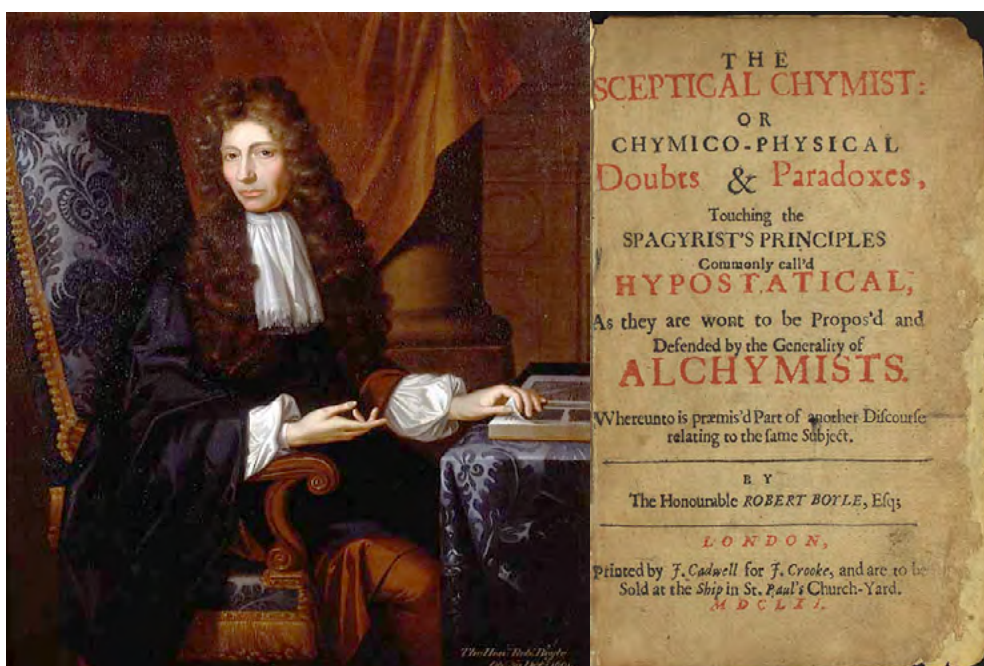


Figura 3. Retrato de Robert Boyle y portada de la primera edición (1661) de su libro *The Sceptical Chymist*.

El alemán Johann Joachim Becher (1635–1682) razonó la existencia de una sustancia hipotética, la *terra pinguis* (tierra grasa), para explicar la combustión, a la que el también alemán Georg Ernst Stahl (1659–1734) denominó *flogisto* y completó la teoría. El médico francés Étienne François Geoffroy (1672–1731) publicó una emblemática *tabla de afinidades* (*table des rapports*) (Figura 4) donde representaba en la cabecera de cada columna una sustancia y debajo, las otras con las que se podía combinar. Defensor del flogisto, rechazó la idea alquimista de la piedra filosofal. En su tabla, se puede apreciar el símbolo alquimista de algunos de los actuales elementos.

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|----|---|---|---|---|
| ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | ▽ | ☉ | ☉ | SM | ♁ | ♀ | ♁ | ♀ | ☾ | ♂ | ☉ | ▽ |
| ☉ | ♁ | ♂ | ♁ | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | ☾ | ♀ | ♁ | ☉ | ♂ | ▽ |
| ☉ | ☉ | ♀ | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | ♂ | ☾ | ♀ | PC | ♀ | ♁ | ♁ | ☉ |
| ▽ | ♀ | ♁ | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | ☉ | ♀ | ♁ | | | | | | |
| SM | ☾ | ♀ | ▽ | | ♁ | | ♁ | ♁ | ♀ | | | | | | |
| | ♀ | ☾ | ♂ | | ♁ | | | ☾ | ♁ | | | | | | |
| | | | ♀ | | | | | ☉ | ☉ | | | | | | |
| | | | ☾ | | | | | ♀ | | | | | | | |
| | ☉ | | | | | | | ☉ | | | | | | | |

- | | | | |
|-----------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------------|
| ☉ Esprits acides. | ▽ Terre absorbante. | ♁ Cuivre. | ♁ Soufre mineral. [Principe. |
| ☉ Acide du sel marin. | SM Substances metalliques. | ♂ Fer. | ♁ Principe huileux ou Soufre |
| ☉ Acide nitreux. | ♁ Mercure. | ♁ Plomb. | ♁ Esprit de vinaigre. |
| ☉ Acide vitriolique. | ♁ Regule d'Antimoine. | ♁ Etain. | ▽ Eau. |
| ☉ Sel alcali fixe. | ☉ Or. | ♁ Zinc | ☉ Sel. [dents |
| ☉ Sel alcali volatil. | ☉ Argent. | PC Pierre Calaminaire. | ▽ Esprit de vin et Esprits ar |

Figura 4. Tabla de afinidades de Geoffroy (1718).

El francés Antoine-Laurent de Lavoisier (1743–1794), en su *Traité Élémentaire de Chimie* (1789), reforzó el concepto de Boyle, postulando que "sustancia simple" es la que no se puede *analizar* (es decir, separar) en otras por procedimientos químicos. Algunas de sus sustancias (en total 33), como la luz y el *calórico* hoy no se consideran elementos y otras, como la cal, son compuestos. Pero ya empleó la clasificación de metales y no metales, vigente en la actualidad y propuso una nomenclatura nueva para simplificar los nombres antiguos de las sustancias químicas (ver Figura 5) (Lavoisier, 1789). En 1777 acuñó el nombre de "oxígeno" (del griego "formador de ácidos") al elemento que habían descubierto poco tiempo antes, de forma independiente, el sueco Carl Wilhelm Scheele (1742–1786) y el inglés Joseph Priestley (1732–1804). Lavoisier consideró que su clasificación era provisional, matizando que se comportaban como sustancias simples "puesto que hasta ahora no hemos descubierto los métodos para descomponerlas". Además, entre otros logros, enunció la ley de conservación de la masa, demostrando la inconsistencia de la teoría del flogisto. Trabajó en colaboración con su esposa, Marie-Anne Pierrette Paulze (1758–1836). Por ello, actualmente es uno de los ejemplos más recurrentes para destacar el papel de la mujer en el desarrollo de la ciencia (Morales López, 2019). El retrato de ambos se recoge en la figura 5.



| | Noms nouveaux. | Noms anciens correspondans. |
|--|--|--|
| | Lumière..... | Lumière. Chaleur. Principe de la chaleur. |
| | Calorique..... | Fluide igné. Feu. Matière du feu & de la chaleur. |
| Substances simples qui appartiennent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme les élémens des corps. | Oxygène..... | Air déphlogistiqué. Air empiréal. Air vital. Base de l'air vital. |
| | Azote..... | Gaz phlogistiqué. Mofete. Base de la mofete. |
| | Hydrogène..... | Gaz inflammable. Base du gaz inflammable. |
| Substances simples non métalliques oxidables & acidifiables. | Soufre..... | Soufre. |
| | Phosphore..... | Phosphore. |
| | Carbone..... | Charbon pur. |
| | Radical muriatique. | Inconnu. |
| | Radical fluorique. | Inconnu. |
| Substances simples métalliques oxidables & acidifiables. | Radical boracique. | Inconnu. |
| | Antimoine..... | Antimoine. |
| | Argent..... | Argent. |
| | Arsenic..... | Arsenic. |
| | Bismuth..... | Bismuth. |
| | Cobolt..... | Cobolt. |
| | Cuivre..... | Cuivre. |
| | Etain..... | Etain. |
| | Fer..... | Fer. |
| | Manganèse..... | Manganèse. |
| | Mercure..... | Mercure. |
| Substances simples fusibles terreuses. | Molybdène..... | Molybdène. |
| | Nickel..... | Nickel. |
| | Or..... | Or. |
| | Platine..... | Platine. |
| | Plomb..... | Plomb. |
| | Tungstène..... | Tungstène. |
| | Zinc..... | Zinc. |
| | Chaux..... | Terre calcaire, chaux. |
| | Magnésie..... | Magnésie, base du sel d'Épſom. |
| | Baryte..... | Barote, terre pesante. |
| Alumine..... | Argile, terre de l'alun, base de l'alun. | |
| | Silice..... | Terre siliceuse, terre vitrifiable. |

Figura 5. Retrato de Antoine L. Lavoisier y su esposa Marie-Anne P. Paulze, por Jacques Louis David (1788) expuesto en el Metropolitan Museum of Art de Nueva York, y lista de 33 sustancias simples recogida por Lavoisier en su *Traité Élémentaire de Chimie* (1789).

La alusión al flogisto es idónea para ilustrar cómo, a pesar de suponer una teoría obsoleta, sirvió en su día para que avanzara la química experimental, incluso en el descubrimiento de nuevos elementos químicos como algunos metales, a lo largo del siglo XVIII.

Buena parte de las conclusiones sobre química por parte de Lavoisier fueron abordadas, años antes, por el conocido como "Leonardo da Vinci ruso" y "el hombre universal", Mijail Vasilevich Lomonósov (1711–1765) quien, entre múltiples aportaciones de diversidad de campos (geografía, astronomía, gramática, química...) anticipó el concepto de átomo.

El inglés John Dalton (1766–1844), que con el tiempo serviría para denominar a la alteración en la capacidad de distinguir los colores (daltonismo) que estudió en él mismo, recuperó la teoría atomista de los griegos para explicar la composición de la materia. En 1808 explicó en *A New System of Chemical Philosophy* que las propiedades específicas de los elementos derivan de sus átomos (del griego "indivisibles") constituyentes, que se podían visualizar como pequeñas esferas. Su teoría sugería que los átomos de distintos elementos poseen diferente masa y propiedades, y que se combinan para formar compuestos en propor-

ciones de números enteros sencillos (1:1, 1:2, 2:3...), lo que se conoce actualmente como ley de proporciones múltiples. Fue de los primeros en determinar los pesos atómicos por comparación del peso de cada sustancia al reaccionar con hidrógeno, tomando como referencia el valor de unidad para este elemento (Pellón, 2003). Representó cada átomo por un círculo con algún símbolo o con la inicial del elemento en inglés, como se recoge en la Figura 6. Su teoría de elemento químico es la actual: una sustancia que no puede descomponerse en otras más sencillas por procedimientos químicos y que está formada por átomos iguales (Pinto Cañón, Castro Acuña, Martínez Urreaga, 2006). Los alumnos pueden realizar modelos de esferas pintadas para discutir y comprender la teoría atómica de Dalton.



Figura 6. Retrato de John Dalton y lista de elementos donde se muestran los símbolos que ideó y sus correspondientes pesos atómicos.

La labor de determinación de pesos atómicos fue perfeccionada por el sueco Jöns J. Berzelius (1779–1848). Además, introdujo la simbología actual de los elementos por su nombre en latín y añadiendo una segunda letra si había que diferenciar entre varios de misma inicial. Surgieron así símbolos como Fe de *ferrum*, Ag de *argentum*, etc. También fue precursor de la formulación actual para los compuestos químicos, pero usando superíndices en vez de subíndices.

Esa tarea de determinación de pesos atómicos la realizó, de forma más concluyente, el italiano Stanislao Cannizzaro (1826–1910), quien distinguió entre pesos moleculares y atómicos y que protagonizó el Congreso de Karlsruhe (Alemania). Se trató de una reunión internacional de química celebrada en 1860 para unificar conceptos, donde se puso de manifiesto que existían ciertas regularidades en las propiedades de los elementos químicos (Román, 2000). Del ámbito latinoamericano asistieron Ramón Torres Muñoz de Luna (1822–1890) por España, Joaquim Simões de Carvalho (1822–1902) por Portugal, y el alemán Ludwig Frie-

drich Posselt (1817–1880) representando a México. El peso atómico de entonces se conoce actualmente como masa atómica relativa. Hasta entonces, existía una fuerte polémica entre *atomistas* (partidarios de emplear pesos atómicos) y *equivalencistas* (preferían trabajar con pesos equivalentes). En aquella época los pesos atómicos se determinaban aplicando la hipótesis de Avogadro para gases (enunciada en 1811) y por aplicación de la ley de Dulong y Petit (conocida desde 1819) para sólidos. Como es bien conocido por los docentes, las diferencias sobre el significado de este tipo de conceptos conllevan cierta controversia. Otro ejemplo del cuidado que hay que prestar al significado y evolución histórica de conceptos es la diferenciación entre valencia (término introducido a finales del siglo XIX para designar el “poder de combinación” de un elemento), carga formal y número de oxidación, no siempre de fácil asimilación por los alumnos.

Desde mediados del siglo XIX hasta el primer tercio del siglo XX, se fue descubriendo cada vez más sobre la constitución de los átomos y se llegó a entender que consisten en pequeños núcleos formados por protones (carga positiva) y neutrones (carga neutra) rodeados de electrones (carga negativa y de mucha menor masa) (Pinto Cañón, Castro Acuña, Martínez Urreaga, 2006, Quílez, Lorente, Sendra, Enciso, 2009). Esto permitió comprender de forma más precisa lo que significa el concepto de elemento químico.

HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA TABLA PERIÓDICA

Para simplificar y racionalizar el estudio de la química de los elementos químicos, hubo múltiples intentos de clasificarlos en función de sus propiedades a lo largo del siglo XIX (Pinto, Martín, Calvo Pascual, de la Fuente, 2019; Scerri, 2013; Esteban Santos, 2009; Moeller, 1959; Calvo Rebollar, 2019; Scerri, 2015). No es fácil mostrar a los alumnos actuales cómo se ha desarrollado la TP, porque ya conocen el “resultado final” actual, pero tiene gran interés pedagógico porque es uno de los ejemplos más paradigmáticos del desarrollo de una teoría dentro de la historia de la ciencia.

Son emblemáticas en esta historia las “tríadas” del alemán Johann Wolfgang Döbereiner (1780–1849), que clasificó en 1829 algunos de los elementos conocidos, por propiedades químicas similares, en grupos de tres (como calcio, estroncio y bario) y advirtió que, en cada *tríada*, el peso atómico de un elemento era la media aritmética de los otros dos, de forma aproximada. A lo largo de dos décadas fue aumentando el número de sus *tríadas*. Para ilustrar un ejemplo de cómo se puede trabajar este aspecto con los alumnos, en la Figura 7 se recoge, aparte de su retrato, un ejemplo desarrollado por el autor de este artículo para que los alumnos trabajen en equipo sobre la construcción de las *tríadas*,

con cuatro de ellas. En este ejemplo, el color común de los elementos representa que tienen propiedades (como la estequiometría en la formación de hidruros u óxidos) similares, y se invita a los participantes a que los agrupen (partiendo de las fichas o cartas descolocadas) por colores iguales y señalen cuántos elementos hay en cada "familia" y si se observa alguna relación entre los pesos atómicos en cada una de estas.



*Dr. Wolfgang Doberiner
Professor an der Universität Bonn
und Ritter des weißen Falkenordens*

| | | |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
| Litio 6,9 | Sodio 23,0 | Potasio 39,1 |
| Calcio 40,1 | Estroncio 87,6 | Bario 137,3 |
| Cloro 35,5 | Bromo 79,9 | Yodo 126,9 |
| Azufre 32,1 | Selenio 79,0 | Telurio 127,6 |

Figura 7. Retrato de Doberiner y ejemplo del autor de este trabajo para recortar "cartas" o fichas para promover entre alumnos la generación de "tríadas" de elementos. Los números son los pesos atómicos y un mismo color denota propiedades análogas.

El ingeniero y geólogo francés Alexandre Émile Béguyer de Chancourtois (1820–1886), en 1862, colocó los elementos conocidos (y algunos compuestos) por orden creciente de peso atómico, sobre una curva helicoidal inscrita alrededor de un cilindro vertical con una circunferencia de 16 unidades (peso atómico del oxígeno), en la que los elementos que caían en la mismavertical tenían propiedades semejantes. Sugirió una ordenación que denominó vis tellurique (tornillo telúrico), y lo representó mediante una curva helicoidal donde el telurio (y de ahí su nombre) estaba en el centro (Chancourtois, 1863). Indicó que "las propiedades de los elementos son las propiedades de los números". En la Figura 8 se recogen dos fragmentos del tornillo telúrico original y una versión realizada por el autor como ejemplo de lo que pueden construir los alumnos para fabricar un cilindro según lo descrito por Chancourtois, y vislumbrar cómo apreció cierta periodicidad en las propiedades de los elementos. Para Scerri (2013), aunque Chancourtois recibió poca atención en su tiempo, fue quien realmente descubrió la periodicidad química.

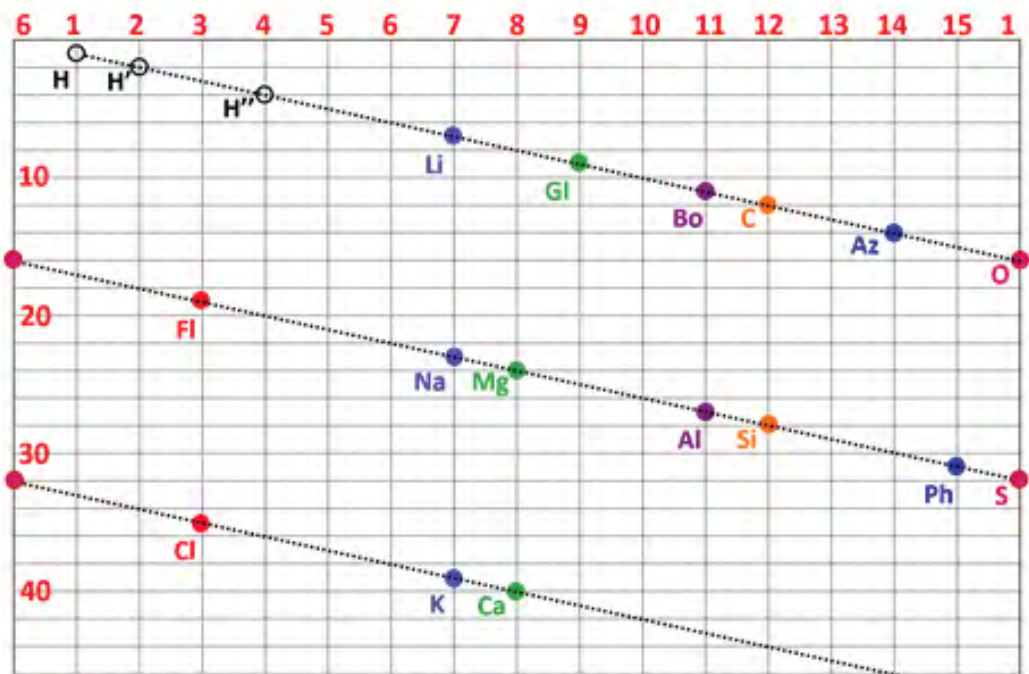
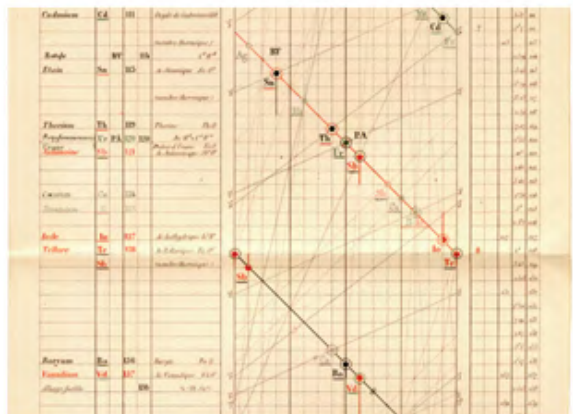


Figura 8. Fragmentos de la hélice telúrica de Chancourtois y dibujo desarrollado por el autor para recortar y pegar los extremos (en forma de cilindro). Se han respetado los símbolos de la época, como el Gl para el glucinio (hoy Be, berilio), boro (Bo, hoy B), Az (ázoe, nitrógeno, hoy N) y Ph (fósforo, hoy P).

El inglés William Odling (1829–1921) propuso en 1864 una clasificación de 57 elementos en trece grupos, de propiedades similares, ordenándolos por pesos atómicos.

En 1865, el químico inglés John Alexander Reina Newlands (1837–1898) apreció que cuando los elementos se ordenaban por pesos atómicos crecientes, cada ocho elementos existían semejanzas en las propiedades físicas y químicas. Como vislumbró en ello cierto parecido con la escala

musical, propuso que se podría denominar, "de forma provisional", como "Ley de las octavas" que fue ridiculizada pero, años después, fue reconocida. En la Figura 9, aparte de una herramienta educativa al respecto desarrollada por el autor, se recoge parte de un artículo de la época donde se informó sobre las octavas y la opinión adversa al respecto de algunos científicos contemporáneos a Newlands (Anónimo, 1866). Como curiosidad, el apellido Reina se debe al origen italiano de su madre. De hecho, Newlands participó muy joven, como voluntario, bajo el mando de Giuseppe Garibaldi en la conquista del reino de Nápoles (1860) para la unificación italiana.

Table II.—Elements arranged in Octaves.

| No. | No. | No. | No. | No. | No. | No. | No. |
|------|-------|-------|------------|------------|-------|-----------|------------|
| H 1 | F 8 | Cl 15 | Co & Ni 22 | Br 29 | Pd 36 | I 42 | Pt & Ir 50 |
| Li 2 | Na 9 | K 16 | Cu 23 | Rb 30 | Ag 37 | Cs 44 | Os 51 |
| G 3 | Mg 10 | Ca 17 | Zn 24 | Sr 31 | Cd 38 | Ba & V 45 | Hg 52 |
| Bo 4 | Al 11 | Cr 19 | Y 25 | Ce & La 33 | U 40 | Ta 46 | Tl 53 |
| C 5 | Si 12 | Ti 18 | In 26 | Zr 32 | Sn 39 | W 47 | Pb 54 |
| N 6 | P 13 | Mn 20 | As 27 | Di & Mo 34 | Sb 41 | Nb 48 | Bi 55 |
| O 7 | S 14 | Fe 21 | Se 28 | Ro & Ru 35 | Te 43 | Au 49 | Th 56 |

Dr. GLADSTONE made objection on the score of its having been assumed that no elements remain to be discovered. The last few years had brought forth thallium, indium, caesium, and rubidium, and now the finding of one more would throw out the whole system. The speaker believed there was as close an analogy subsisting between the metals named in the last vertical column as in any of the elements standing on the same horizontal line.

Professor G. F. FOSTER humorously inquired of Mr. Newlands whether he had ever examined the elements according to the order of their initial letters? For he believed that any arrangement would present occasional coincidences, but he condemned one which placed so far apart manganese and chromium, or iron from nickel and cobalt.

Mr. NEWLANDS said that he had tried several other schemes before arriving at that now proposed. One founded upon the specific gravity of the elements had altogether failed, and no relation could be worked out of the atomic weights under any other system than that of Cannizzarro.



Figura 9. Octavas de Newlands y tratamiento de su propuesta según una publicación de 1866 [Anónimo], e instrumentos musicales que utiliza el autor para explicar la "ley de las octavas".

De forma independiente, dos asistentes al Congreso de Karlsruhe, Mendeléiev y el alemán Julius Lothar Meyer (1830–1895), menos conocido en su tiempo, establecieron que existe una ley periódica, por la que las propiedades de los elementos (unos 60 entonces) se repiten con cierta periodicidad al aumentar su peso atómico. En la Figura 10 se muestra un retrato de ambos. La tabla de Meyer está fechada en diciembre de 1868, pero no se publicó hasta 1870, mientras que la de Mendeléiev fue comunicada por Menshutkin (por enfermedad del autor), en octubre de 1868, a las Sociedad Rusa de Química y se publicó en 1869 (Figura 11). Mendeléiev fue más consciente de la importancia de su clasificación, que fue modificando durante las cuatro décadas siguientes.

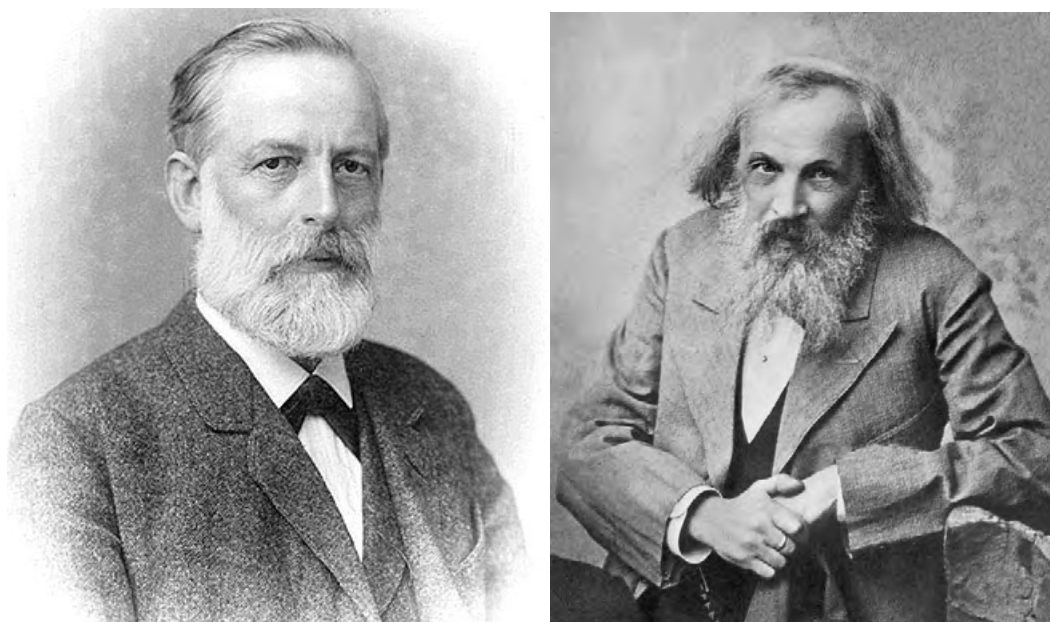


Figura 10. Retratos de Meyer (izq.) y Mendeléiev.



Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. Von D. Mendelejeff. — Ordnet man Elemente nach zunehmenden Atomgewichten in verticale Reihen so, dass die Horizontalreihen analoge Elemente enthalten, wieder nach zunehmendem Atomgewicht geordnet, so erhält man folgende Zusammenstellung, aus der sich einige allgemeinere Folgerungen ableiten lassen.

| | | | | | |
|--|--|--|----------|----------|----------|
| | | | Ti=50 | Zr=90 | ?=180 |
| | | | 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=59 | Pd=106,6 | Os=199 |
| | | | Cu=63,4 | Ag=108 | Hg=200 |
| | | | Zn=65,2 | Cd=112 | |
| | | | ?=68 | Ur=116 | Au=197? |
| | | | ?=70 | Sn=118 | |
| | | | As=75 | Sb=122 | Bi=210? |
| | | | Se=79,4 | Te=128? | |
| | | | Br=80 | J=127 | |
| | | | K=39 | Rb=85,4 | Cs=133 |
| | | | Sr=87,6 | Ba=137 | Pb=207 |
| | | | ?=45 | Ce=92 | |
| | | | ?Er=56 | La=94 | |
| | | | ?Yt=60 | Di=95 | |
| | | | ?In=75,6 | Th=118? | |

1. Die nach der Größe des Atomgewichts geordneten Elemente zeigen eine stufenweise Abänderung in den Eigenschaften.
2. Chemisch-analoge Elemente haben entweder übereinstimmende Atomgewichte (Pt, Ir, Os), oder letztere nehmen gleichviel zu (K, Rb, Cs).
3. Das Anordnen nach den Atomgewichten entspricht der *Werthigkeit* der Elemente und bis zu einem gewissen Grade der Verschiedenheit im chemischen Verhalten, z. B. Li, Be, B, C, N, O, F.
4. Die in der Natur verbreitetsten Elemente haben *kleine* Atomgewichte.

Figura 11. Imágenes de la tabla periódica desarrollada por Mendeléiev en su cuaderno de laboratorio y en la revista alemana *Zeitschrift für Chemie* (1869).

No se descubrieron todos los elementos predichos por Mendeléiev a lo largo de su vida, pero visto siglo y medio después resulta admirable su intuición, considerando la inexactitud de muchos de los datos de que disponía. De su tabla se deducía una periodicidad de las propiedades, referidas esencialmente a las proporciones con las que se combinaban los elementos, y que dependían, a su juicio, de los pesos atómicos. Lo más relevante es que predijo la existencia de elementos que se descubrirían después, como el galio (*ekaaluminio*) y el germanio (*ekasilicio*), y que cambiara el orden en algún par de elementos [Román Polo, 2002]. De forma análoga a lo referido sobre las tríadas anteriormente, en la Figura 12 se recoge la tabla realizada por el autor para que, al recortar cada elemento, los alumnos los agrupen por propiedades parecidas (representado por el color común), colocando el menos pesado arriba a la izquierda y el resto, por peso atómico creciente, al bajar en cada columna y hacia la derecha de cada fila. Seguidamente se les pregunta si aparecen huecos y si se pueden colocar así los 11 elementos seleccionados.

| | | |
|------------------|------------------|-----------------|
| Si = 28 | ? = 70 | Sn = 118 |
| P = 31 | As = 75 | Sb = 122 |
| S = 32 | Se = 79,4 | Te = 128 |
| Cl = 35,5 | Br = 80 | J = 127 |

Figura 12. Ejemplo de tabla diseñada por el autor de este trabajo para para recortar "cartas" con las que promover entre alumnos el conocimiento de diseño de tabla periódica por Mendéleiev. Los números son los pesos atómicos de la época. Se mantiene el símbolo original para el yodo, J, en vez de la i actual.

Gracias a la TP de Mendeléeiev y otras como las comentadas, se pudieron relacionar las propiedades de los elementos y sus compuestos con otros de comportamiento similar, lo que sirvió de impulso para la racionalización de la química y, con ello, se facilita su estudio. Entre los problemas estaban, como se ha comentado, los "huecos" de elementos y algunas inversiones de orden, como telurio-yodo, que en un principio justificó por errores en el cálculo de pesos atómicos. Estas inversiones se explicarían en 1913, como otros aspectos esenciales de la TP, por la aportación del físico inglés Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887–1915), al justificar el concepto de número atómico, mediante la ley que lleva su nombre, que establece la relación empírica entre la frecuencia de los rayos X emitidos por cada elemento, con su número atómico (Figura 13) (Moseley, 1914). Fue la base para establecer la "ley periódica" moderna, según la cual, las propiedades físicas y químicas de los elementos muestran tendencias periódicas al ponerlos en orden por número atómico (y no del peso atómico, como la primitiva ley periódica de Mendeléeiev). Moseley falleció con solo 27 años en la batalla de Galípoli (Turquía, 1915) en la Primera Guerra Mundial. Su trabajo fue fundamental para la comprensión de la estructura atómica (en concreto, el modelo de Bohr) y de la propia TP. La denominación de número atómico (*atomzahl* en alemán) con Z parece que procede de la palabra alemana *zahl* (número) que se asociaba a cada elemento, en la época de Moseley.



Figura 13. Fotografía de Moseley en el laboratorio Balliol-Trinity de la Universidad de Oxford (1910) y la representación de la raíz cuadrada de las frecuencias de emisión de rayos X de los elementos en relación a su número atómico, publicada en *Philosophical Magazine* (1914).

Las aportaciones de Mendeléiev, Meyer y otros científicos del siglo XIX, en la construcción de la TP, se acrecientan si se considera que, en su época, no se conocía la estructura de la materia a nivel atómico, y que la separación y la purificación de los elementos eran rudimentarias. Estos autores se solían referir a un "sistema periódico", término que permanece aún en idiomas como el alemán (*periodensystem*) si bien, con el tiempo, se fue denominando "tabla periódica" en otros como inglés (*periodic table*), francés (*tableau* o *table périodique*) y español (donde coexisten ambas denominaciones), al tratarse de una ordenación de los elementos en filas y columnas.

Entre otros muchos investigadores que han destacado en la historia de la construcción de la TP y en el descubrimiento de elementos, se citan aquí algunos más, por su especial importancia. En 1868 se descubrió el primer gas noble, helio, a partir de las líneas espectrales de la cromosfera del Sol, por el astrónomo francés Pierre Jules César Janssen (1824–

1907), lo que fue muy controvertido por no haberse encontrado en la Tierra y por discutirse si era algún tipo de hidrógeno. En 1895 el físico inglés John William Strutt, conocido como Lord Rayleigh (1842–1919) descubrió el argón, en colaboración con el químico escocés William Ramsay (1852–1916). Este último descubrió tres años después otros gases nobles (Kr, Ne y Xe). Aunque inicialmente estos gases le supusieron una contrariedad a Mendeléiev, pues no había previsto un lugar adecuado en su tabla, finalmente fueron una brillante confirmación de su ley periódica, y se incluirían por Ramsay como grupo 0 de la TP. En la Figura 14 se muestran dos caricaturas de la época de Ramsay (donde señala en una TP los elementos que descubrió) y de William Crookes (1832–1919), químico inglés también muy popular en su día, que descubrió el talio y, como tantos otros investigadores, con una biografía digna de ser profundizada por los alumnos.

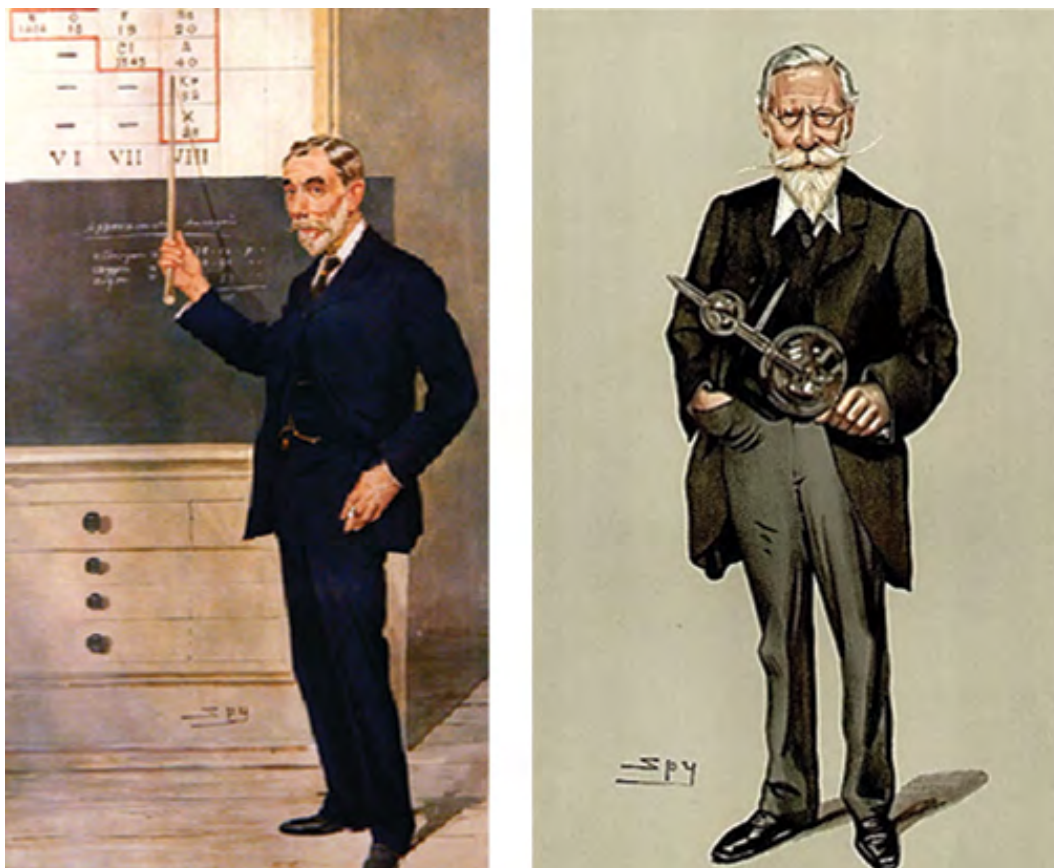


Figura 14. Caricaturas de principios del siglo XX de Ramsay (izq.) y de Crookes

El químico y físico inglés Frederick Soddy (1877–1956) explicó la importancia del peso atómico ponderado (teniendo en cuenta la proporción de cada isótopo) y fue quien acuñó el término "isótopo" (Soddy, 1913). Creó este neologismo basado en las palabras griegas isos (igual) y topos

(lugar), refiriéndose a átomos con igual número de protones (número atómico) y distinta masa atómica (por poseer diferente número de neutrones). Él mismo explicó que se le ocurrió la denominación de isótopos o elementos isotópicos, por ocupar el mismo lugar en la TP y ser químicamente idénticos.

El físico danés Niels Henrik David Bohr (1885–1962) realizó contribuciones fundamentales para la comprensión de la estructura del átomo y de la mecánica cuántica, como el físico alemán Erwin Schrödinger (1887–1961).

Más recientemente, a partir de los años cuarenta del pasado siglo, el químico nuclear norteamericano Glenn Theodore Seaborg (1912–1999) colaboró activamente en el descubrimiento y aislamiento de diez elementos transuránicos (de mayor número atómico que el uranio): Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No y Sg (este se denominó seaborgio en su honor). En la Figura 15 se muestra una fotografía de Seaborg donde la imagen de la TP al fondo resalta lo consciente que fue este investigador en su desarrollo.



Figura 15. Fotografía de Seaborg.

Aunque un estudio detallado excedería los objetivos de este trabajo, en la Figura 16 se ilustran algunas de las teorías atómicas más relevantes, dado que su comprensión ha sido esencial para comprender la ley periódica. Al respecto, se recomienda visitar la web donde el profesor Andy Brunning, muy conocido en los últimos años por sus infografías sobre conceptos relacionados con la química, explica y resume, de forma muy didáctica, aspectos sobre la estructura de la materia y la propia tabla periódica (Brunning, 2019). En este punto, la Figura 17 recoge un "icono" típico sobre la estructura atómica, ampliamente extendido e incluso tomado por asociaciones y webs de sociedades científicas; aunque es un símbolo muy conocido, refleja una estructura para el átomo que puede ser negativa para alumnos de ciertas edades y público en general, pues les podría llevar a pensar en un núcleo de gran tamaño rodeado de "órbitas" sobre las que giran los electrones a modo de movimientos planetarios con trayectorias definidas. Es un ejemplo del cuidado que hay que tener con los símbolos y analogías. Otro ejemplo es que, según parece, el propio Joseph John Thomson (1856–1940) se lamentó de la popularidad de su analogía para su "modelo del pudín de pasas", donde parece que los electrones están incrustados y estáticos, cuando él era consciente de que tenían que estar en continuo movimiento.

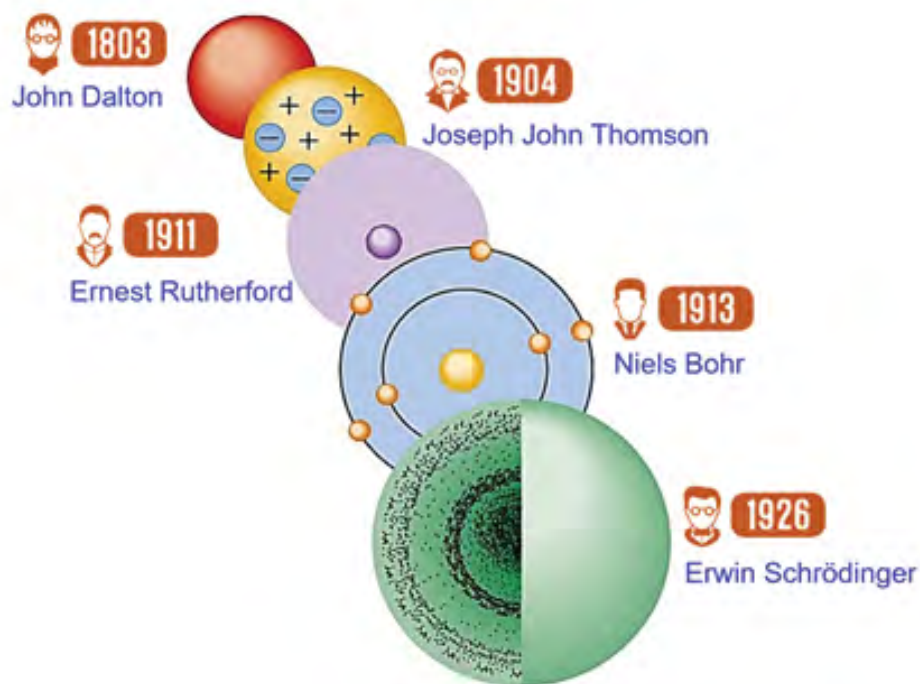


Figura 16. Esquema de la evolución de los modelos atómicos.

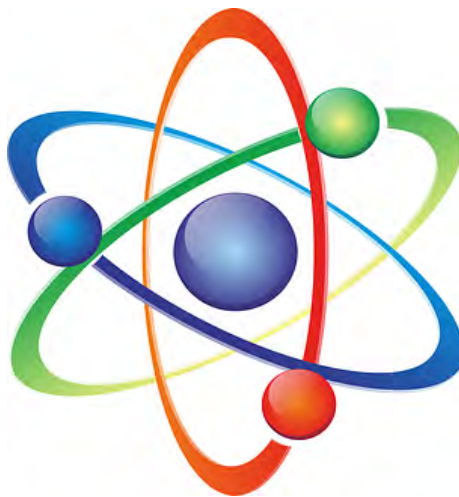


Figura 17. Icono típico para representar la estructura atómica.

La mecánica cuántica, consolidada a finales de la década de los 20, aportaría la explicación actual de la TP. Así, las propiedades de los elementos varían periódicamente con el número atómico (número de protones del núcleo del átomo, coincidente con su número de electrones de la corteza) que no siempre implica un aumento de peso atómico (dependiente del número de protones pero también del número de neutrones presentes en el núcleo atómico). Los electrones se distribuyen en orbitales atómicos con energía "cuantizada", no continua. Otro aspecto que conviene indicar es que la periodicidad no se produce para los mismos intervalos, sino sucesivamente, cada 2, 8, 8, 18, 18, 32 y 32 unidades de número atómico. Las propiedades físicas y químicas se repiten aproximadamente al repetirse la disposición de los electrones de la capa electrónica más externa (de valencia). Así, los alcalinotérreos, como el magnesio y el calcio, poseen propiedades análogas, como la formación de cationes M^{2+} , porque la configuración de su capa de valencia es del tipo s^2 , mientras que los halógenos, como el cloro y el bromo, tienen propiedades similares, como la formación de aniones X^- , porque su configuración es del tipo s^2p^5 , o todos los gases nobles son muy poco reactivos porque tienen completa su capa de valencia (s^2p^6).

Esto no es sencillo de asimilar por estudiantes de educación secundaria, pero su potencialidad didáctica es tan relevante que en muchos países, como España, se aborda (desde hace décadas) en los currículos oficiales para alumnos de 14-15 años de edad (Pinto, Martín, Calvo Pascual, de la Fuente, 2019); en otros, se opta por enseñar una química más macroscópica en la etapa introductoria y estos aspectos se abordan en cursos superiores.

Cuando el autor de este trabajo expone aspectos de la tabla periódica para alumnos de distintas etapas educativas y público en general, suele

aludir a la contribución “española”, calificándola de “digna” (Pinto Cañón 2019). Solo hay del orden de una decena de países cuyos científicos han descubierto 2 o más de los elementos (Elguero, 2007), y uno de ellos es España, con tres, como se resalta en uno de los sellos de la Figura 18, emitido con ocasión del Año Internacional de la Tabla Periódica. En todo caso, a veces es difícil precisar quién descubre un elemento químico: ¿La primera persona que lo detecta? ¿El primero que lo aísla? ¿El que lo caracteriza en primer lugar? Incluso, puede haber controversias porque se realizó el descubrimiento en distintos sitios y los protagonistas tuvieron diferente fortuna en la difusión de su conocimiento. Tampoco todos los países actuales se corresponden con los de hace cien o doscientos años, ni parece conveniente hacer de esta cuestión un ejercicio de nacionalismo, dado que, como se ha señalado, la TP es un logro colectivo. Los tres elementos aludidos son: el platino, descubierto por el marino y científico ilustrado Antonio de Ulloa y de la Torre (1716–1795), natural de Sevilla, durante la expedición científica conocida como *Misión Geodésica* por los actuales Colombia, Ecuador y Perú (Pinto, 2017); el wolframio, descubierto en el *Real Seminario Patriótico de Vergara* (Guipúzcoa) por los hermanos logroñeses Elhuyar y Lubice: Juan José (1754–1796) y Fausto Fermín (1755–1833); y el vanadio, descubierto por el madrileño Andrés Manuel del Río Fernández (1764–1849) en México. Aunque la RAE admite también la denominación de tungsteno (más extendida en el ámbito anglosajón), la comunidad de químicos españoles suele preferir que se designe wolframio.

Otras aportaciones españolas, más recientes, de la época conocida como Edad de Plata de la ciencia española, en la primer tercio del siglo XX, son las de Blas Cabrera y Felipe (1878–1945) en el estudio de las propiedades magnéticas de los átomos, las de Enrique Moles Ormella (1883–1953), que llegó a ser secretario de la *Comisión de Pesos Atómicos* de la IUPAC, y las de Miguel Antonio Catalán Sañudo (1894–1957), por su interpretación de la configuración electrónica y la elaboración de una TP basada en los espectros atómicos. Aparte del sello ya mencionado, en la Figura 18 se muestra otro emitido en España en 2007, con ocasión del centenario de la muerte de Mendéleiev, que fue diseñado por el profesor Javier García Martínez (Pinto, 2007), que recientemente fue elegido para presidir la IUPAC entre 2022 y 2023.

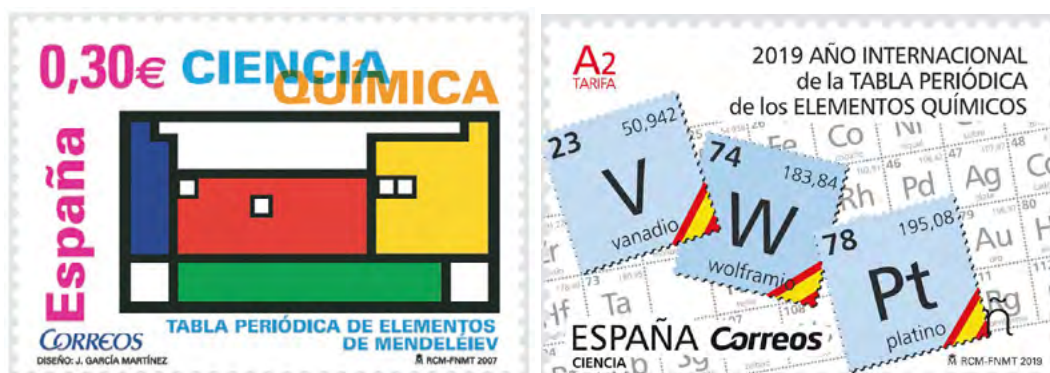


Figura 18. Sellos emitidos en España sobre la tabla periódica, en 2007 y en 2019.

Entre la abundante bibliografía sobre la génesis e historia de la TP, se recomienda el reciente trabajo de Andriiko y Lunk (2018). En la Figura 19 se incluye una figura donde se representa la evolución del conocimiento de elementos químicos desde la antigüedad hasta el presente, acompañada de hitos en su desarrollo y, brevemente, distintas tecnologías que facilitaron el descubrimiento de nuevos elementos.

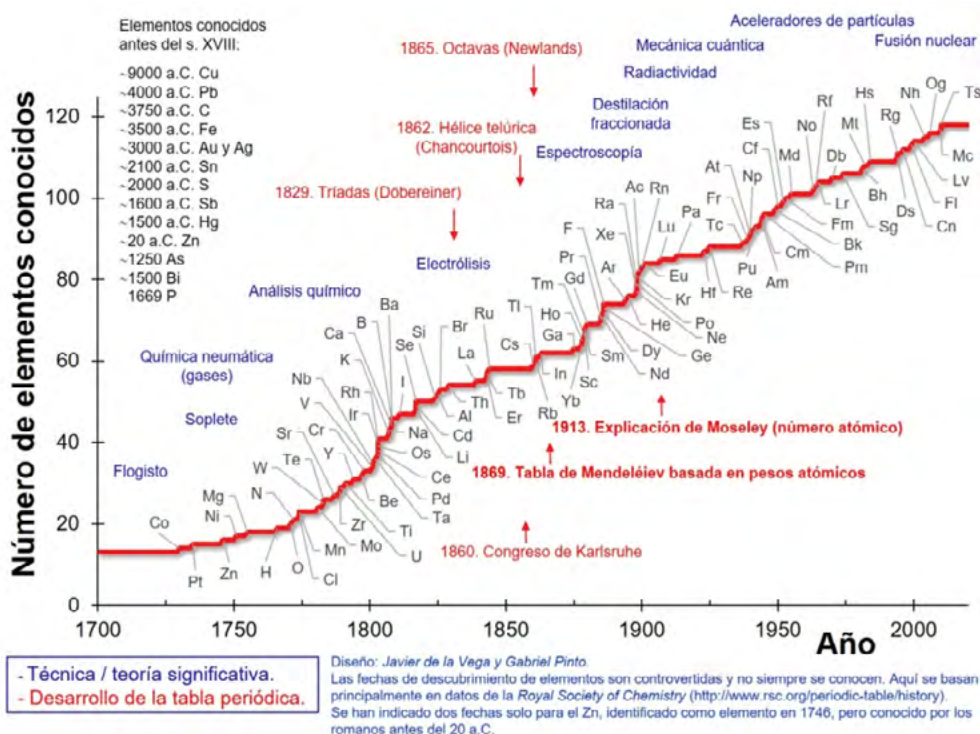


Figura 19. Evolución temporal del conocimiento de elementos químicos desde la antigüedad hasta el presente, acompañada de hitos en su desarrollo y, brevemente, distintas tecnologías que facilitaron el descubrimiento de nuevos elementos.

Un trabajo motivador para muchos alumnos podría ser buscar las biografías de los personajes (y otros relacionados con ellos) que aparecen en este artículo e indagar sobre el origen de los nombres de los elementos, que remiten a localidades, países, científicos, propiedades, mitología, etc. (Román Polo, 2018).

FORMAS DE REPRESENTAR LA TABLA PERIÓDICA

La labor del profesorado, el alumnado y las editoriales de libros de texto en la evolución de la TP ha sido crucial. Esto no es habitual; es de los pocos ejemplos que podemos encontrar en ciencias donde un logro científico no ha sido el resultado únicamente de trabajos en laboratorios universitarios y de centros de investigación, sino que se ha desarrollado también en las aulas. El propio Mendeléiev se esforzó en clasificar los elementos químicos con objeto, en buena medida, de racionalizar el estudio de la química inorgánica para un libro de texto. Parece ser que era muy aficionado a los juegos de cartas de solitarios, con los que se entretenía en sus frecuentes viajes en tren. Según relatos apócrifos, durante uno de estos, para visitar varias fábricas, preparó una carta para cada elemento, donde anotó en cada una el peso atómico y propiedades típicas; al ordenarlas por peso atómico, se convenció de que las propiedades se repetían con cierta periodicidad de los pesos atómicos.

La TP de Mendeléiev pasó a explicarse en las aulas universitarias con relativa rapidez. Según Villafañe (2019), la primera mención en un libro de texto escrito en español es en el titulado *Tratado Elemental de Química General y Descriptiva*, escrito por Santiago Bonilla Mirat (1844–1899) en 1880 y donde, en el epígrafe titulado “Fundamentos de la clasificación de Mendeléeff”, se describen los “principios de la ley periódica” y se refieren los descubrimientos del galio y del escandio. En la Figura 20 se muestra la considerada como la TP educativa más antigua conservada; se encontró de casualidad hace pocos años en la Universidad de Saint Andrews (Escocia) y se supone que data de alrededor de 1885. En la Figura 21 se muestra otro ejemplo de TP académica muy común en los años 30 del pasado siglo, donde se seguía el modelo propuesto por el químico estonio Andreas von Antropoff (1878–1956). Doctorado en Heidelberg (Alemania), se formó con Ramsay en Londres y fue profesor en San Petersburgo. Tras ser arrestado en 1918 por el Soviet de Petrogrado, pasó a trabajar en la Universidad de Bonn, donde llegó a decano y destacó por ser un nacionalsocialista convencido. En su modelo de TP, cada grupo se identifica con diferentes colores (elegidos por alguna propiedad de los elementos correspondientes), mediante barras de unión entrelazadas (Mans, 2010). En la Figura 22 se muestra un ejemplo de TP de un libro de texto editado a mediados de los años cincuenta del siglo pasado (Galmés, 1955); como curiosidad, se observa que figura el elemento ilinio en lugar del nombre que adoptaría con posterioridad: prometio.

Periodische Gesetzmässigkeit der Elemente nach Mendeleieff

| Reihen | Gruppe I R ² O | Gruppe II RO | Gruppe III R ² O ³ | Gruppe IV RH ⁴ RO ² | Gruppe V RH ³ R ² O ⁵ | Gruppe VI RH ² RO ³ | Gruppe VII RH R ² O ⁷ | Gruppe VIII RO ⁴ |
|--------|------------------------------|-----------------|---|---|--|---|---|-------------------------------------|
| 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 | Sc=44 | Ti=48 | V=51 | Cr=52 | Mn=55 | Fe=56, Co=59 Ni=59, Cu=63 |
| 5 | (Cu=63) | Zn=65 | Ga=68 | --=72 | As=75 | Se=79 | 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 | Sn=118 | Sb=122 | Te=125 | J=127 | |
| 8 | Cs=133 | Ba=137 | Ce=137 | La=139 | - | Di=145? | - | - - - - |
| 9 | (-) | - | - | - | - | - | - | - - - - |
| 10 | - 165 | - 169 | Er=170 | -173 | Ta=182 | W=184 | - | Pt=194, Os=195(?) Ir=193, Au=196 |

Figura 20. Tabla periódica de alrededor de 1885 utilizada en la Universidad de Saint Andrews.

SISTEMA PERIODICO DE LOS ELEMENTOS

| I | | | | | | | | | | | | | | | | | | II | |
|---------|----------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|--------|-------|---------|---------|----|
| H | | | | | | | | | | | | | | | | | | He | |
| 0 | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | | | | | | | | | | 10 | |
| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | | | | | | | | 11 | |
| He | Li | Be | B | C | N | O | F | Ne | | | | | | | | | | Ar | |
| 20,0 | 6,94 | 9,02 | 10,82 | 12,00 | 14,008 | 16,00 | 19,00 | 20,2 | | | | | | | | | | 39,9 | |
| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | | | | | | | | 19 | |
| Ne | Na | Mg | Al | Si | P | S | Cl | Ar | | | | | | | | | | Kr | |
| 20,2 | 22,997 | 24,32 | 26,97 | 28,06 | 31,04 | 32,07 | 35,457 | 39,94 | | | | | | | | | | 83,8 | |
| 0 | Ia | IIa | IIIa | IVa | Va | VIa | VIIa | VIIIa | Ia | IIa | IIIa | IVa | Va | VIa | VIIa | VIIIa | 0 | | |
| 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | |
| Ar | K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr | |
| 37,94 | 39,098 | 40,078 | 44,956 | 47,88 | 50,942 | 51,996 | 54,938 | 55,845 | 58,933 | 58,693 | 63,546 | 65,38 | 69,723 | 72,64 | 74,96 | 78,96 | 81,904 | 83,8 | |
| 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | |
| Kr | Rb | Sr | Yt | Zr | Nb | Mo | Mn | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | X | |
| 83,8 | 85,468 | 87,62 | 88,906 | 91,224 | 92,906 | 95,94 | 101,07 | 102,906 | 106,42 | 107,868 | 112,411 | 114,818 | 118,710 | 121,757 | 127,5 | 127,6 | 126,905 | 126,905 | |
| 54 | 55 | 56 | 57 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | |
| X | Cs | Ba | La | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Em | |
| 132,905 | 132,905 | 137,327 | 138,905 | 178,48 | 180,948 | 183,84 | 186,207 | 190,23 | 193,224 | 197,22 | 198,906 | 200,59 | 204,38 | 207,2 | 208,98 | 210,0 | 210,0 | 222,0 | |
| 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | | | | | | | | | | | | | 93 |
| Em | Vg | Ra | Ac | Th | Pa | U | | | | | | | | | | | | | 94 |
| 226,0 | 226,0 | 226,0 | 227,0 | 232,0 | 231,0 | 238,0 | | | | | | | | | | | | | 94 |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
| 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | TIERRAS RARAS | | | | | |
| Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | | | | | | | |
| 140,2 | 140,9076 | 144,24 | 150,41 | 151,96 | 157,25 | 162,50 | 164,93 | 167,26 | 171,95 | 174,97 | 176,94 | 178,49 | | | | | | | |

Figura 21. Tabla periódica que sigue el modelo de von Antropoff, conservada en el Instituto de Educación Secundaria San Isidro de Madrid. Fotografía realizada y remitida al autor por las profesoras M^a. José Gómez y Rosario Ramos, respectivamente.

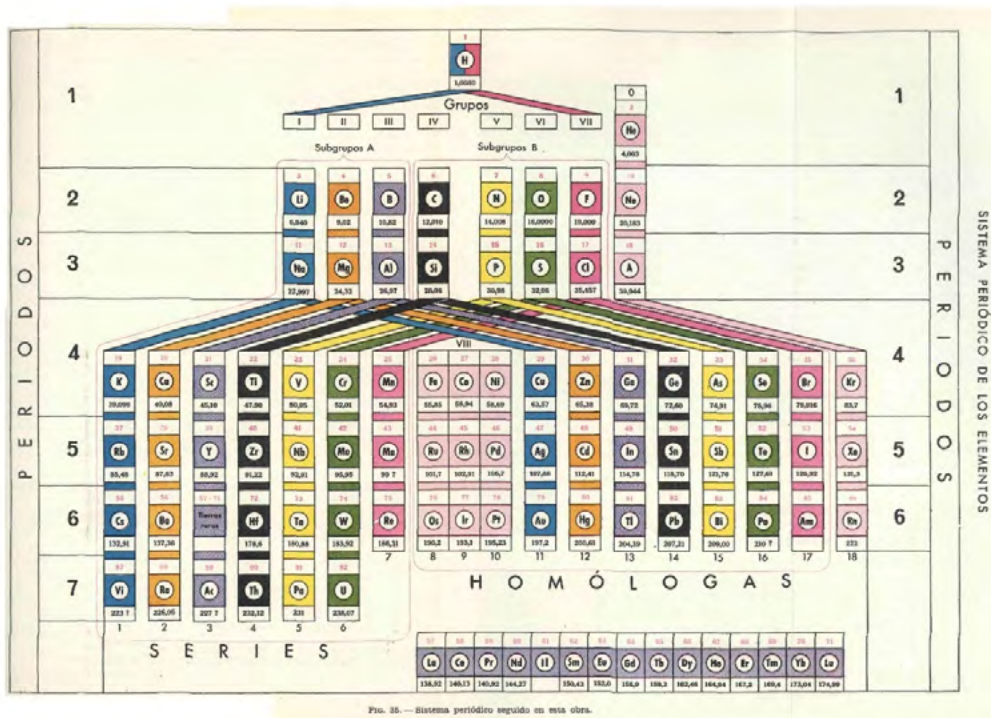


Figura 22. Tabla periódica de mediados del siglo XX

Se han ideado diferentes estructuras a lo largo de la historia a partir de la TP inicial de Mendeléiev, colocando los elementos de formas variadas. Las familias de elementos con propiedades similares, que en un principio representó en filas, ahora (como ya hizo él mismo en sucesivas actualizaciones) se recogen en columnas. Los profesores Álvarez y Mans (2019) describen la evolución de la TP a lo largo de 150 años en la Universidad de Barcelona y, con ella, en otras instituciones y publicaciones. Destacan que “la tabla periódica es un organismo vivo”, como analogía para destacar que no es una herramienta estanca, sino que evoluciona con el tiempo.

La forma de TP más conocida y usada, que aparece en casi todos los libros de texto y publicaciones actuales, es la que se muestra en la Figura 23. En este modelo hay 7 períodos; a veces se incluye un octavo con solo dos elementos, Uue (119, *ununennium*) y Ubn (120, *unbinilium*), aún no descubiertos. También hay 18 columnas numeradas de la 1 a la 18. Hace unos años, las columnas (familias o grupos de elementos) se designaban por grupos IA a VIII A (elementos representativos) y de IB a VIIB, más un VIII (que incluye los grupos del Ni, Fe y Co), para agrupar los metales de transición. Algunos grupos tienen nombre especial, como alcalinos, alcalinotérreos y halógenos.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|----------|----------|----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1 H | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 He |
| 2 | 3 Li | 4 Be | | | | | | | | | | | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | 10 Ne |
| 3 | 11 Na | 12 Mg | | | | | | | | | | | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | 18 Ar |
| 4 | 19 K | 20 Ca | 21 Sc | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr |
| 5 | 37 Rb | 38 Sr | 39 Y | 40 Zr | 41 Nb | 42 Mo | 43 Tc | 44 Ru | 45 Rh | 46 Pd | 47 Ag | 48 Cd | 49 In | 50 Sn | 51 Sb | 52 Te | 53 I | 54 Xe |
| 6 | 55 Cs | 56 Ba | 57 La | * 72 Hf | 73 Ta | 74 W | 75 Re | 76 Os | 77 Ir | 78 Pt | 79 Au | 80 Hg | 81 Tl | 82 Pb | 83 Bi | 84 Po | 85 At | 86 Rn |
| 7 | 87 Fr | 88 Ra | 89 Ac | * 104 Rf | 105 Db | 106 Sg | 107 Bh | 108 Hs | 109 Mt | 110 Ds | 111 Rg | 112 Cn | 113 Nh | 114 Fl | 115 Mc | 116 Lv | 117 Ts | 118 Og |
| | | | | * 58 Ce | 59 Pr | 60 Nd | 61 Pm | 62 Sm | 63 Eu | 64 Gd | 65 Tb | 66 Dy | 67 Ho | 68 Er | 69 Tm | 70 Yb | 71 Lu | |
| | | | | * 90 Th | 91 Pa | 92 U | 93 Np | 94 Pu | 95 Am | 96 Cm | 97 Bk | 98 Cf | 99 Es | 100 Fm | 101 Md | 102 No | 103 Lr | |

Figura 23. Modelo de TP más utilizado en la actualidad.

Existen aún ciertas discrepancias sobre algunos aspectos. Así, en algún caso se coloca el He encima del Be, por ser la columna de las configuraciones electrónicas s^2 , pero se suele ubicar encima del Ne, como típico gas noble que es. Con el H ocurre algo similar; aunque se suele colocar encima del Li, porque ambos son de configuración s^1 , a veces se dispone encima del F por presentar propiedades más similares a las de los halógenos que a las de los metales alcalinos. Existen muchas variedades de colores, que suelen representar tres grandes familias de elementos: metales, no metales y semimetales (también denominados metaloides). Pero también se usan colores, a veces, para distinguir los elementos que se presentan como sólido, líquido o gas, en condiciones especificadas de temperatura y presión, así como si se trata de elementos sintéticos. El galio se identifica en algunas TP como líquido pero, en realidad, su punto de fusión normal es 29,8 °C.

El modelo de TP de 18 columnas se atribuye al químico norteamericano Horace Groves Deming (1885–1970), que lo publicó en 1923, para los elementos conocidos entonces. La empresa química y farmacéutica Merck la distribuyó ampliamente por centros de enseñanza media de Estados Unidos desde 1928 y, en la década siguiente, se difundió en manuales y enciclopedias de química por la empresa de material educativo Sargent-Welch.

Lo mínimo que suele figurar en la casilla de cada elemento en las TP actuales es su símbolo, nombre, número atómico y peso atómico, pero también se pueden incluir otras muchas propiedades (electronegatividad, estados de oxidación, puntos de fusión y ebullición, configuración electrónica, etc.).

Por no realizar figuras de TP excesivamente anchas, los elementos de transición interna (lantánidos y actínidos) se colocan generalmente en filas debajo de la TP general, con varias versiones. En la mostrada en la Figura 23, se han colocado el La y el Ac (como primeros lantánidos y actínidos, respectivamente) debajo del Y. En otras, se disponen en esas posiciones al Lu y al Lr (como últimos lantánidos y actínidos, respectivamente). También existen versiones de TP donde lantánidos y actínidos están insertados en la propia tabla principal, con lo que queda muy alargada.

La interpretación de estos ordenamientos está de acuerdo a las configuraciones electrónicas de los elementos, de forma que, una vez se domina la cuestión, es muy fácil entender qué configuración electrónica posee cada elemento, solo observando dónde está ubicado en la TP.

En todo caso, ha habido, y sigue habiendo, multitud de propuestas menos convencionales, mostrando muchas veces importantes dotes de creatividad. Entre otras, se recogen dos ejemplos al respecto en la Figura 24.

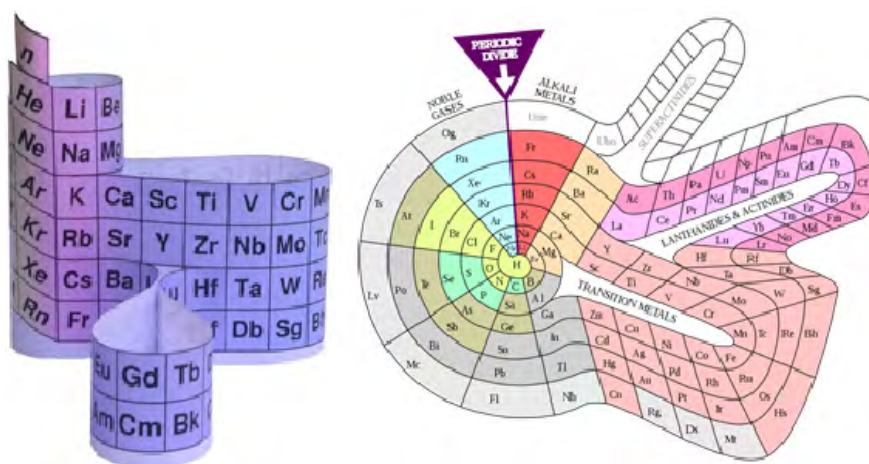


Figura 24. Propuestas de tablas periódicas. Izq.: Por Roy Alexander (patentada en 1971), con forma tridimensional. Der.: Por Theodor Benfey (1964), donde se agrupan los elementos en una espiral con los metales de transición, lantánidos y actínidos formando "penínsulas".

SIGNIFICADO E INTERPRETACIÓN DE LA TABLA PERIÓDICA MODERNA

Como se ha indicado, podemos considerar la TP hoy en día como un reflejo de los resultados de la física cuántica en cuanto a la interpretación de las configuraciones electrónicas. Pero no conviene olvidar que también nos explica con bastante precisión por qué las propiedades atómicas de los elementos varían de forma periódica con el número atómico y, por tanto, con la posición que ocupan los elementos en la TP. Dicho de

otro modo, gracias a los estudios de Mendeléiev y otros autores sobre cómo variaban las propiedades de los elementos, y gracias a los avances sobre la comprensión de la estructura atómica, se ha podido elaborar una TP de los elementos que nos permite razonar e interpretar de una forma óptima cómo varían muchas propiedades. Dado que el estudio de esto en detalle excede los objetivos de este artículo, se recomienda al lector interesado que visite la página Web de la *Royal Society of Chemistry* (Royal Society of Chemistry, RSC), que incluye también información para descargar como *app*. Se incluye allí una TP interactiva donde se puede elegir una presentación convencional de los elementos (con sus símbolos) o con imágenes. En ella, se puede visualizar el estado físico de cada elemento (entre 0K y 6000K de temperatura), se incluyen una breve historia (incluso en formato *podcast* y en vídeo) e información sobre el origen etimológico de cada elemento y, quizá lo más interesante, se puede elegir una propiedad determinada (densidad, radio atómico, electronegatividad, punto de fusión, punto de ebullición y energía de la primera ionización) para apreciar de forma muy visual lo que significa la periodicidad. Es así una buena ocasión para que los alumnos indaguen sobre esta cuestión. Algunos recursos para el aprendizaje tanto de los modelos atómicos como de las propiedades periódicas de los elementos se recogieron en un trabajo anterior (Pinto, 2018).

Otra fuente de información muy relevante sobre la TP es la que se ofrece en la Web con el título de *Webelements* (Winter), que incluye incluso la posibilidad de comprar productos curiosos (modelos moleculares, camisetas, accesorios, pósteres, etc.) sobre el tema.

Saber sobre la TP no es una mera curiosidad; conociéndola bien y entendiendo sobre las variaciones periódicas que refleja, se puede justificar perfectamente cómo se forma un semiconductor tipo "n" o "p", por "dopado" de un elemento como el Si o el Ge, se pueden valorar alternativas para sintetizar nuevos superconductores de materiales cerámicos avanzados, se puede razonar el efecto biológico de un catión u otro, o predecir qué elementos se forman por desintegración radiactiva a partir de los núcleos de un elemento concreto, por poner algunos ejemplos.

Entre la infinidad de recursos existentes para explicar las propiedades periódicas de una forma atractiva para los alumnos, se comenta brevemente una experiencia ideada por el autor de este trabajo para estudiar la variación de la conductividad eléctrica. Los participantes (pueden ser desde dos a varias decenas de personas) hacen un corro dándose la mano y dos de ellos sujetan un "*energy stick*" (juguete científico de bajo coste) (Prada Pérez de Azpeitia, Martínez Pons 2019), que se enciende y suena (lleva tres LEDs y un generador de ruido) al cerrarse el circuito (la piel "conduce" por el sudor). Se ponen, entre dos manos del corro,

diversos elementos químicos en forma de objetos cotidianos: Cu (un trozo de tubería), C (un lapicero con puntas en los dos extremos), Fe (un clavo); Au (un anillo), S (un cilindro de venta en parafarmacias para calmar el dolor de cuello, que en España se comercializa con el nombre de "calmalín"). Los participantes deben discutir la conductividad encontrada con la estructura (el profesor puede aportar modelos para distinguir entre el grafito y diamante, o de moléculas de S_8 , etc.) y posición del elemento en la TP. Es especialmente curioso realizar esta experiencia con un papel pintado con lapiceros de dos tipos: H (*hard*, no conduce, porque aparte de grafito lleva bastante arcilla en la mina) y B (*black*, que conduce mejor porque tiene más grafito). La Figura 25 recoge fotografías de eventos donde se realizaron este tipo de medidas.



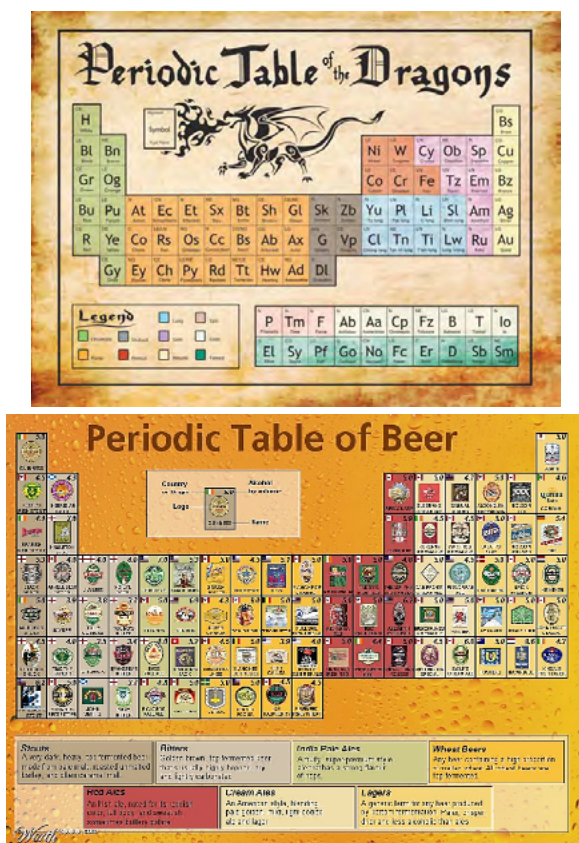
Figura 25. Detección de la conductividad eléctrica de la piel con un *energy stick* y sobre un papel con láminas de grafito depositadas con un lápiz tipo B.

Algunas aportaciones sobre el futuro previsible de la TP se publicaron por el autor recientemente (Pinto Cañón, 2019). También se aporta información al respecto en el monográfico que, con motivo de la celebración del año internacional de la TP, editó la Real Sociedad Española de Química (Pinto, Martín, Pellón, Román, 2019). En dicho monográfico se recogen, en una página por cada uno, las características de los 118 elementos conocidos y de dos que están potencialmente por descubrir (Uue y Ubn), así como un artículo donde se introduce la TP que ha diseñado EuChemS para concienciar sobre la importancia de los elementos químicos y la sostenibilidad, y otro que describe la vida y obra de Mendeléiev.

LA TABLA PERIÓDICA COMO ICONO CULTURAL Y FUENTE DE INSPIRACIÓN CREATIVA

Para lectores con deseos de seguir introduciéndose en el tema de la TP y para que se recomiende su lectura a alumnos y público en general, se sugiere, aparte de los textos recogidos en las referencias, dos libros: el de Oliver Sacks, (2006), donde explica el atractivo que le supuso la tabla periódica en su infancia, aunque profesionalmente se dedicó, ya de adulto, a la neurología, y el de Theodore Gray (2009), con fotografías espectaculares sobre los elementos químicos y sus aplicaciones realizadas por Nick Mann y él mismo, que se recogen también en una página Web. Son ejemplos de la potencialidad de la TP como fuente de inspiración literaria.

La TP también es motivo de inspiración para otro tipo artes, como cine, teatro, pintura, etc. y, cómo no, de publicidad. Entre los múltiples ejemplos que ha habido y han surgido con motivo de la efeméride celebrada en 2019, se han seleccionado algunos que se muestran en la Figura 26. Estos ejemplos también pueden ser herramientas educativas: se puede discutir si responden a una variación periódica de algo, si el número de casillas coincide con el de la TP, entre otras cuestiones.



CONCLUSIONES

La historia de la construcción de la TP es un ejemplo de cómo se desarrolla la ciencia. El resultado es apasionante; es difícil imaginar en cualquier área del saber otro esquema tan fundamentado y con tanta información útil recogida en una tabla que entra en una hoja. Este icono universal no sólo es historia; es clave para entender muchos avances y progresos en multitud de áreas, como la física nuclear, la ciencia de los materiales, la biomedicina, por mencionar algunas.

A lo largo de este trabajo, se han destacado algunas ideas sobre la TP que se pueden resumir en:

- Para su comprensión y desarrollo histórico se necesita tener unas ideas básicas sobre el concepto de elemento químico, tipos de elementos y la historia de sus descubrimientos.
- Debe comprenderse la importancia que, durante las primeras décadas del planteamiento de las propiedades periódicas, tuvieron los conceptos de pesos atómicos y equivalentes.
- Es necesario entender la evolución en los dos últimos siglos de nuestro conocimiento de la estructura atómica.
- Se resalta que la TP es un logro que se ha conseguido con un importante aporte desde el ámbito de la educación en sus distintas etapas.
- La TP (en sus distintas versiones gráficas) justifica las propiedades físicas y químicas periódicas de los elementos.
- La TP es un importante recurso educativo y, por la implicación de tecnologías (descubrimiento de elementos), áreas científicas (física, química, geología...) y aspectos artísticos diversos, no solo se limita a la química sino que es excelente para el ámbito STEAM.
- La base de la interpretación de la TP moderna es la química cuántica. Eso no quiere decir que los alumnos en edades tempranas tengan que conocer esta área a fondo pero, según edad y nivel educativo, sí sus consecuencias (por ejemplo, las configuraciones electrónicas).
- Se trata de un icono cultural del mundo contemporáneo.
- Es fuente de inspiración para la creatividad en distintos aspectos artísticos y comerciales.
- Es un ejemplo de resultado científico que no está terminado ni, quizá, pueda estarlo nunca. Esto puede ser especialmente instructivo para las nuevas generaciones, que apreciarán así que "queda mucho por hacer" en el desarrollo científico.

E incluso se podría añadir una última conclusión sobre la TP: su estudio es una oportunidad para aprender de todo (ciencia, historia, etimología, literatura...). Y el autor de este trabajo da cuenta de ello; en sus más de 30 años de profesor universitario, jamás había aprendido sobre temas tan diversos como con ocasión de las actividades en las que se ha implicado con motivo de la efeméride en torno a la TP.

Ojalá la celebración del *Año Internacional de la Tabla Periódica*, en el sesquicentenario de la propuesta inicial de Mendeléiev, haya servido para que se conozca más, especialmente por las jóvenes generaciones, esta joya de la humanidad, no siempre suficientemente valorada.

AGRADECIMIENTO

Se agradece la invitación de la Prof. Dra. M. Gabriela Lorenzo para publicar este trabajo. También se agradece la ayuda recibida de la Fundación Obra Social "La Caixa", a través del proyecto divulgativo "La tabla periódica: un icono de la ciencia que merece conocerse".

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Álvarez, S., Mans, C. (2019) *150 Anys de taules periòdiques a la Universitat de Barcelona*, Universitat de Barcelona.

Andriiko, A. A., Lunk, H. J. (2018). The short form of Mendeleev's Periodic Table of Chemical Elements: toolbox for learning the basics of inorganic chemistry. A contribution to celebrate 150 years of the Periodic Table in 2019, *Nature*. <https://doi.org/10.1007/s40828-018-0059-y>

Anónimo, (1866). Proceedings of Societies, *Chemical News*, 13, 113.

Aragón, F. (2004). *Historia de la química*, Síntesis, Madrid.

Asimov, I. (1985). *Breve historia de la química*, Alianza Editorial, Madrid.

Brunning, A. (2019). *Compound Interest*. <https://www.compound-chem.com/>

Calvo Rebollar, M. (2019). *Construyendo la tabla periódica*, Prames, Zaragoza.

Chancourtois, A. E. B. (1863). *Vis tellurique: classement naturel des corps simples ou radicaux obtenu au moyen d'un système de classification hélicoïdal et numérique*, Mallet-Bachelie, París.

Elguero, J. (2007). España y los elementos de la tabla periódica, *Anales de Química*, 103(4), 70-76.

Esteban Santos, S. (2009). *La historia del sistema periódico*, Cuadernos

de la UNED, Madrid.

- Galmés, J. (1955). Química inorgánica, Salvat, Barcelona
- Gray, T. (2009). *The elements: A visual exploration of every known atom in the universe*. Black Dog y Leventhal Publishers. Nueva York. Con información complementaria (imágenes, vídeos, etc.) en: <https://bit.ly/36OJIBy>
- International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), (2019) *The International Year of the Periodic Table: A common language for science*. <https://www.iypt2019.org/>
- Lavoisier, A. (1789). *Traité Élémentaire de Chimie*, Cuchet, París, p. 192.
- Mans, C. (2010). La tabla periódica del edificio histórico de la Universidad de Barcelona, *Química e Industria*, 587, 36-40.
- Moeller, T. (1959) *Química inorgánica*, 3ª edición, Reverté, Barcelona.
- Morales López, A.I. (2019). Hacia la igualdad de género en la historia del sistema periódico, *Anales de Química*, 115(3), 227-234.
- Moseley, H. G. J. (1914). The high-frequency spectra of the elements, Part II, *Philosophical Magazine*, 27, 709.
- Pellón, I., (2003). *Dalton: El hombre que pesó los átomos*, Nivola, Tres Cantos, Madrid.
- Pinto Cañón, G., Castro Acuña, C. M. Martínez Urreaga, J. (2006). *Química al alcance de todos*, Pearson Alhambra, Madrid.
- Pinto Cañón, G. (2019) *La tabla periódica: algo más que un icono de la ciencia*. En Quintín Garrido (Ed.), "Ciencia. Y un gran paso para la humanidad", Ed. Apadrina la Ciencia. Madrid, pp. 42-55. Accesible en: <https://bit.ly/2GJnYuW>
- Pinto, G. (2007). A postage stamp about the periodic table, *Journal of Chemical Education*, 84, 1919.
- Pinto, G. (2017). Antonio de Ulloa and the discovery of platinum: An opportunity to connect science and history through a postage stamp, *Journal of Chemical Education*, 94, 970-975.
- Pinto, G. (2019). El concurso escolar "Nuestra tabla periódica": Una iniciativa para fomentar la motivación del profesorado y alumnado en áreas STEAM, *Anales de Química*, 115(4) 332-343.
- Pinto, G., Martín, M., Pellón, I., Román, P. (Ed.), (2019). Número monográfico por el Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos, *Anales de Química*, 115(2). Accesible en: <https://bit.ly/2rm5Gvy>

- Pinto, G., Martín, M., Calvo Pascual, M. A., de la Fuente, A. (2019). Año internacional de la tabla periódica (2019): Una oportunidad para abordar contextos de didáctica e historia de la física y la química, *Revista Española de Física*, 33(1), 10-18.
- Pinto, G. (2018). Modelos atómicos y propiedades periódicas de los elementos químicos: Recursos para el aprendizaje, *Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 93, 41-45.
- Prada Pérez de Azpeitia, F. I., Martínez Pons, J. A. (2019). La física es cool con el energy stick y la bola de plasma, *Revista Española de Física*, 33(1), 36-39.
- Quílez, J., Lorente, S., Sendra, F., Enciso, E. (2009). *Afinidad química: 2º curso de bachillerato*, ECIR Editorial, Paterna, Valencia.
- Real Academia Española (2019), <https://www.rae.es/>
- Román Polo, P. (2018). Los nombres de los elementos químicos desde el siglo XVIII hasta nuestros días. En D. Ruíz-Berdún, (Ed.), *Ciencia y Técnica en la Universidad: Trabajos de historia de las ciencias y de las técnicas, Vol. I*. Universidad de Alcalá: Servicio de Publicaciones, pp. 173-184.
- Román Polo, P. (2002). *Mendeléiev: El profeta del orden químico*, Nivola, Tres Cantos, Madrid.
- Román, P. (2000). El congreso de Karlsruhe y sus personajes, *Anales de Química*, 96(4), 45-53.
- Royal Society of Chemistry (RSC). Periodic table. <http://www.rsc.org/periodic-table/>
- Sacks, O. (2006). *El tío Tungsteno: Recuerdos de un químico precoz*, Anagrama, Madrid.
- Scerri, E. (2013). *La tabla periódica: Una breve introducción*, Alianza Editorial, Madrid.
- Scerri, E. (2015). The discovery of the periodic table as a case of simultaneous discovery, *Phil. Trans. R. Soc. A* 373: 20140172.
- Soddy, F. (1913). Intra-atomic charge, *Nature*, 92, 399-400.
- UNESCO, (2018). 2019 is proclaimed the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements. <https://bit.ly/31MZQ31>
- Villafañe, F. (2019). Santiago Bonilla Mirat: Retrato de un químico olvidado, *Anales de Química*, 115(4), 326-331.
- Winter, M. *Webelements: The periodic table on the WWW*. <https://www.webelements.com/>