

La Tabla Periódica: un microscopio para ver el interior del átomo

Por José Luis Villaveces*

* Subdirector de Colciencias; profesor grupo de química teórica Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

La Tabla Periódica, el instrumento donde están organizados en hileras y columnas los diferentes elementos químicos conocidos, reflejo de la Ley Periódica, le ha permitido a la humanidad conocer la intimidad de la materia y disfrutar de las maravillosas aplicaciones de la química, con las cuales tratamos en cada instante de nuestras vidas. En eso radica la belleza y utilidad del aporte de Mendeleev. El presente artículo del doctor Villaveces explica la importancia que la Tabla y la ley que la sustenta tienen para el conocimiento de los fenómenos químicos de la materia. Deslinde

Introducción

Hace unos meses escribí en la *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*¹ un artículo a propósito de las bases filosóficas de la química, en el que decía, en nota al pie de la página, que la Ley Periódica de Mendeleev fue un microscopio poderoso que permitió por primera vez entrever el interior del átomo. El Dr. Guillermo Guevara, encargado de la sección de ciencia y tecnología de *Deslinde*, me invitó amablemente a ampliar esa afirmación. Trataré de hacerlo en estas páginas.

Nuestros bachilleres, enfrentados por primera vez a la Tabla Periódica, no suelen pensar en ella desde la perspectiva de la Ley Periódica. Con frecuencia les he preguntado por la Tabla a los que ingresan a la carrera de química en la Universidad Nacional (¡supuestamente los más motivados por la química entre todos los colombianos!). Casi todos tienen la idea de que es una tablita con información útil sobre los átomos, una especie de soplete o comprimido, que ayuda a contestar los exámenes. En el mejor de los casos, un catálogo. Cuando les pregunto si no preferirían que estuviera ordenada alfabéticamente para no tener la complicación de buscar un elemento cuyo peso atómico no recuerdan, casi todos responden que sí.

Hay una distancia enorme entre un microscopio y un catálogo. ¿Cómo puede el instrumento que nos permitió ver por primera vez el interior del átomo haber perdido toda su fuerza hasta convertirse en esto? Pocos logran explicar por qué la Ley Periódica fue considerada como uno de los triunfos más importantes de la ciencia del siglo XIX. Al fin y al cabo la construcción de un índice o de un manual es una labor paciente y ordenada pero bastante trivial y no debería haber bastado para dar fama internacional a Dimitri Ivanovich Mendeleev.

Alguna vez que fui invitado por la ACAC² a dar una conferencia en una sesión de "Encuentro con el futuro", la titulé "¿Por qué es tan aburrida la Tabla Periódica?". Ese día traté de explicar que la mala práctica docente de algunos maestros podría volver aburrido el fútbol si lo enseñaran como hacen con la química, es decir, si en vez de dejarnos jugar en los recreos o ver los mejores partidos en el estadio y en la televisión, nos obligaran a aprendernos de memoria los resultados de los mundiales, sin haber visto jamás un juego, sin que pudiéramos entender de dónde salen los marcadores o sin darnos una idea suficiente de lo que es un gol, una pena máxima o un tiro de esquina. Confrontados a listas de marcadores, de jugadores y de nombres de equipos sin ninguna referencia externa y obligados a memorizarlos para pasar un examen, no podríamos menos de decidir que el fútbol es algo aburrido e inútil. Algo así pasa con la Ley Periódica y con el conjunto de la química, para no hablar de otras asignaturas de nuestra enseñanza básica y media.

El hecho es que la Tabla Periódica y, sobre todo la Ley Periódica, están entre los triunfos más grandes de la ciencia del siglo XIX y de todos los tiempos y fueron un microscopio increíblemente potente que nos permitió, por primera vez desde las audaces especulaciones de los griegos, ver el interior del átomo y entender algo sobre su estructura; y todo esto va mucho más allá de una aburrida y conveniente forma resumida de dar las propiedades de los elementos. Los párrafos siguientes tratarán de argumentar por qué es así.

La explicación atómica del mundo

El problema de la química y uno de los problemas que más han atraído la atención de la humanidad es el de cómo explicar un mundo tan uniforme con tanta variedad. Vemos una inmensa diversidad de sustancias en el mundo: vivas e inertes, líquidas y sólidas, duras y suaves, coloridas e incoloras. Parece haber mucha distancia entre una tierra rojiza y granulosa y un metal brillante y duro, entre un leño fuerte y una hoja suave, entre una roca y el agua que brota de ella, entre el dulce vino y el fuerte vinagre. Sin embargo, todas estas y millones de otras sustancias parecen seguir las mismas leyes de comportamiento: todas caen a tierra, muchas de ellas al calentarlas se expanden, si se calientan mucho más, los sólidos pasan a líquidos a no ser que antes se quemen; los líquidos tienden a pasar a sólidos al enfriarse. Muchas otras formas iguales de comportamiento son comunes a muy diversas manifestaciones de la materia y, lo que es más extraño aún, objetos muy diversos son fácilmente interconvertibles unos en otros: la tierra rojiza, por la acción del fuego, se torna en brillante metal; el vino dulce, hirviendo suavemente (fermentándose) se convierte en vinagre. Desde la prehistoria hasta nuestros días, la química ha ido encontrando más y más vías para transformar la materia y hoy hacemos suaves telas o fortísimos materiales a partir del fétido petróleo.

¿Cómo es posible tanta variedad dentro de tanta unidad? ¿Cómo es posible tanta uniformidad de comportamiento dentro de tal diversidad de propiedades? ¿Cómo pueden cosas tan distintas transformarse unas en otras y modificar tanto sus propiedades? ¿Qué tienen en común el untuoso petróleo y el suave nylon, la verde malaquita y el brillante cobre, el negro grafito y el duro diamante, la aromática fruta y las hediondas heces?

Los griegos se preguntaron esto y llegaron a la conclusión de que la materia no podía estar conformada por multitud de sustancias diferentes, sino por unos pocos principios básicos, organizados de distintas maneras: unos pocos cuerpos elementales o "elementos". La diversidad no estaría entonces en los principios: el mundo no sería un caos de cosas distintas, sino un cosmos de unas pocas cosas, ordenadas de muchas maneras distintas. Algo así como el lenguaje, en el cual millones y billones de palabras y de textos tan distintos y contradictorios pueden componerse con unas pocas letras. ¿Cuántos y cuáles elementos? Ese era el dilema. Algunos supusieron que unas cuatro sustancias primigenias bastaban si estaban dotadas de las propiedades fundamentales de lo cálido y lo frío, lo seco y lo húmedo, y así se forjó la hipótesis de los cuatro elementos clásicos: agua (fría y húmeda), tierra (fría y seca), aire (cálido y húmedo), fuego (cálido y seco). Aunque esta idea tuvo mucho éxito y sobrevivió como teoría científica hasta hace unos cuatro siglos, desde el principio se vio que era muy difícil explicar la inmensa variedad de la naturaleza con sólo estas cuatro propiedades³.

Como alternativa surgió la teoría atómica entre los jónicos. Ellos partieron de la evidencia de que la materia se subdividía en partículas mucho más pequeñas que lo más pequeño que podemos ver. A diferencia de lo que suelen decir irresponsablemente muchos libros de texto contemporáneos, esto no era especulación vana sino resultado de la observación atenta de muchos fenómenos. Lucrecio, que escribió en la antigua Roma un libro de texto sobre teoría atómica⁴ comienza por analizar la fuerza del viento, cuyos efectos son claros aunque no lo podamos ver, y luego de varios argumentos concluye: "*Hay así prueba sobre prueba de que el viento tiene cuerpos invisibles que en su acción y comportamiento rivalizan con los grandes ríos, cuyos cuerpos son fáciles de ver*". Y continúa con otras observaciones que le confirman la idea: los olores de las cosas, que podemos sentir a pesar de que no vemos sus partículas alcanzar nuestra nariz; del hecho de que la ropa colgada cerca al mar agitado se vuelva húmeda y puesta al sol se seque, sin que hayamos podido ver la humedad cuando llegó ni cuando volvió a ser expelida por el calor: "*Se sigue que la humedad se subdivide en partes diminutas que el ojo no puede ver*". Los anillos que se desgastan con el uso, la gota de agua que taladra la piedra, el pavimento que se acaba y el movimiento del polvo en el aire son otras tantas evidencias observacionales de que "*la naturaleza actúa por intermedio de cuerpos invisibles*". Parecía claro que estos cuerpos invisibles, muy pequeños, entraran en la composición de las cosas y al salir o entrar algunos de ellos en un material o al disponerse de otra manera cambian las propiedades del material, de la misma manera que cambia un escrito al cambiar las letras. Así se encontró una explicación diferente del mundo, como formado por partículas diminutas –los átomos– que al combinarse en distintas formas generaban toda la variedad de la naturaleza y explicaban la manera en que unos cuerpos se transforman en otros. Ahora había nuevas preguntas: ¿cuántas clases distintas de átomos se requieren?, ¿en qué se diferencian unos de otros?

Átomos modernos

La ciencia moderna surgió en el siglo XVII, impulsada por Galileo, Newton y otros. Newton se interesó por la teoría atómica y trató de imaginar qué fuerzas podrían mantener unidos a los átomos; suponía que debían parecerse a la Fuerza de Gravedad y que seguramente disminuirían con el cuadrado de la distancia entre ellos. Es decir, con el nacimiento de la nueva ciencia el interés por los átomos se revivió y el esfuerzo ahora era explicar las transformaciones de las sustancias con base en la recombinación de los átomos, pero dándole un cariz moderno, es decir, tipificando las fuerzas entre ellos y midiendo sus propiedades.

El primer avance importante lo hizo, más de cien años después de Newton, otro inglés: John Dalton. En 1804, él pudo, por primera vez en la historia, *pesar* los átomos. Con esto pasaron de ser una idea interesante a ser objetos físicos susceptibles de ser medidos. Estrictamente hablando, Dalton no pesó átomo por átomo, pero sí pudo saber cuántas veces más pesado que un átomo de hidrógeno es uno de oxígeno, uno de carbono o uno de cualquier otro elemento que se combinara fácilmente con el hidrógeno. En esta forma construyó una tabla de *pesos relativos de los átomos* que, con algunas mejoras, es la misma que usamos hoy. Pocos años después, el químico sueco Jöns Jacob Berzelius hizo otro avance al explicar la unión entre un átomo y otro por medio de fuerzas eléctricas. Logró mostrar que hay átomos muy positivos y otros muy negativos y que los unos tienden a unirse con los otros, siendo el más negativo de todos el oxígeno, que se une con todos: con los muy positivos oxidándolos rápida y brutalmente, con los poco positivos oxidándolos lentamente y con los negativos volviéndolos ácidos⁵. En esta forma explicó el que los átomos se unieran los unos con los otros, dando lugar a cuerpos estables, por medio de fuerzas físicas que comenzaban a ser bien conocidas. Se dio así otro paso hacia el objetivo de tener a los átomos como objetos físicos susceptibles de ser observados.

¿Cómo están hechos los átomos?

Aunque los átomos comenzaran a ser objetos físicos mensurables que se unían mediante fuerzas físicas, permanecía la pregunta de cuántas clases de átomos distintos había. A mediados del siglo XIX se conocían unos sesenta elementos químicos distintos y empezaba a parecer que para cada uno de ellos había un tipo de átomo particular, de manera que ya había sesenta átomos distintos y las viejas preguntas se repetían: ¿por qué tantos átomos distintos?, ¿cuántos otros distintos puede haber?, ¿cuántos debería haber en un universo bien ordenado?

De hecho, no todos aceptaban lo anterior y volvían sobre el viejo planteamiento. Todos esos diferentes átomos deben estar hechos de la misma materia fundamental o de un número muy pequeño de materias disímiles. Hacia 1810 Prout decía que esa materia fundamental debía ser el hidrógeno, dado que los pesos atómicos que se empezaban a medir parecían ser múltiplos enteros del de hidrógeno. La polémica se dio muy fuertemente a lo largo de toda la primera mitad de ese siglo entre quienes sostenían que cada elemento tiene su propio tipo de átomo y, por lo tanto, hay tantos átomos distintos como elementos distintos y quienes querían buscar una unidad más profunda que el átomo elemental, de la cual estuvieran hechos todos los átomos.

Otras preguntas importantes se podían plantear: si la materia está hecha de átomos, ¿de qué están hechos los átomos? No podía ser de otros átomos, sino de algo más fundamental. Y si es así, ¿está cada átomo hecho de una materia distinta? En ese caso, ¿en qué se diferencian las distintas materias primas unas de otras? ¿Existe relación entre ellas? ¿No estamos repitiendo los mismos problemas del mundo ahora a escala microscópica? ¿Existe de verdad un nivel más fundamental en el que las cosas se expliquen? En último término, ésta era una nueva manifestación de la vieja preocupación de saber si vivimos en un cosmos ordenado que sigue unas pocas leyes bien claras y bien obedecidas, o si vivimos en un caos total en el que las cosas se dan por azar y nosotros mismos no somos más que una fluctuación del desorden universal. De la labor paciente de un químico muy ordenado salió una respuesta clara: los átomos de los distintos elementos guardan relaciones muy fuertes entre sí. Es tan clara la relación entre todos ellos que no puede ser sino la evidencia de que están formados de los mismos componentes y abrigan dentro de ellos una estructura interna que los relaciona y que se ordena en función de su peso: a medida que el peso aumenta, la estructura interna dibuja un patrón preciso.

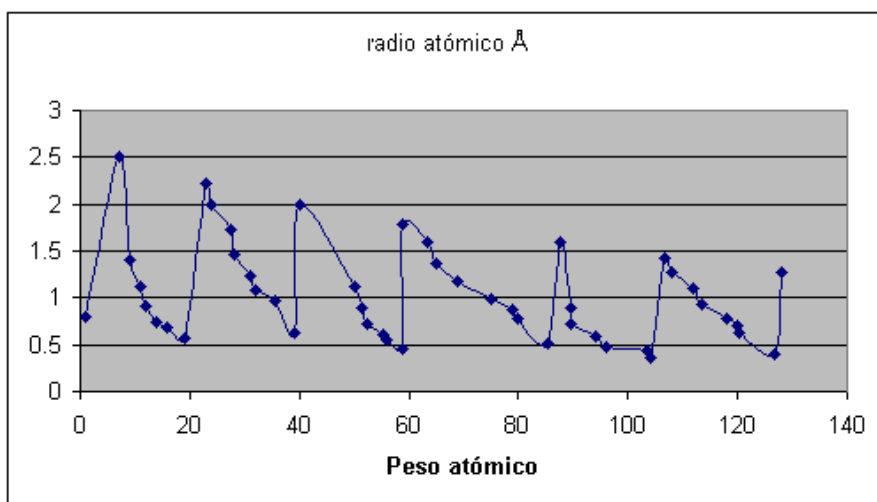
La Ley Periódica

La tarea concreta realizada por Mendeleev hacia 1860 consistió en organizar todos los 63 elementos con mucho cuidado, anotando todas sus propiedades y viendo cómo variaban entre ellas. La tarea intelectual consistió en darse cuenta de que eso reflejaba una armonía profunda en el interior del átomo. Los pesos atómicos, que Dalton había aprendido a medir al comienzo del siglo, parecían ser una propiedad de importancia fundamental, puesto que cada elemento tenía un peso preciso y unos elementos se diferenciaban de otros por su peso atómico. Por eso tenía sentido mirar las demás propiedades en función de ellos. Antes de Mendeleev se habían hecho algunos ensayos que habían aportado algunas luces, pero la principal limitación radicaba en que no se conocían con certeza los valores del peso atómico para muchos elementos, pues había distintos métodos y teorías que conducían a valores diferentes. De hecho, la confusión era tan grande que los mejores químicos decidieron que era importante reunirse todos para discutir a fondo y llegar a un acuerdo. Así, se reunieron en 1860 en Karlsruhe, Alemania, y esta reunión es de gran importancia, porque fue el primer Congreso Internacional de Ciencia que se realizó en el mundo. Esa práctica, tan extendida hoy, de realizar congresos científicos nació motivada por la necesidad de ponerse de acuerdo sobre la manera de determinar los pesos de los átomos. La reunión fue un fracaso en el sentido de que no logró su cometido y los asistentes partieron a sus casas con las mismas posiciones divergentes que habían traído, pero por otro lado fue un éxito porque en ella un profesor de química de la Universidad de Génova, Stanislao Cannizzaro, distribuyó copias del librito de texto que usaba para dar sus clases de teoría atómica –"*Sunto di un curso de philosophia chimica*" (Resumen de un Curso de Filosofía Química)– y varios de ellos al volver a casa lo leyeron, encontrando que ahí estaba la solución del problema. Después de Karlsruhe y del librito de Cannizzaro, pronto empezó a haber tablas unificadas de pesos atómicos, que son esencialmente las mismas que utilizamos hoy, y Mendeleev pudo comenzar su enorme labor de estudiar la influencia del peso atómico en todas las propiedades de los elementos.

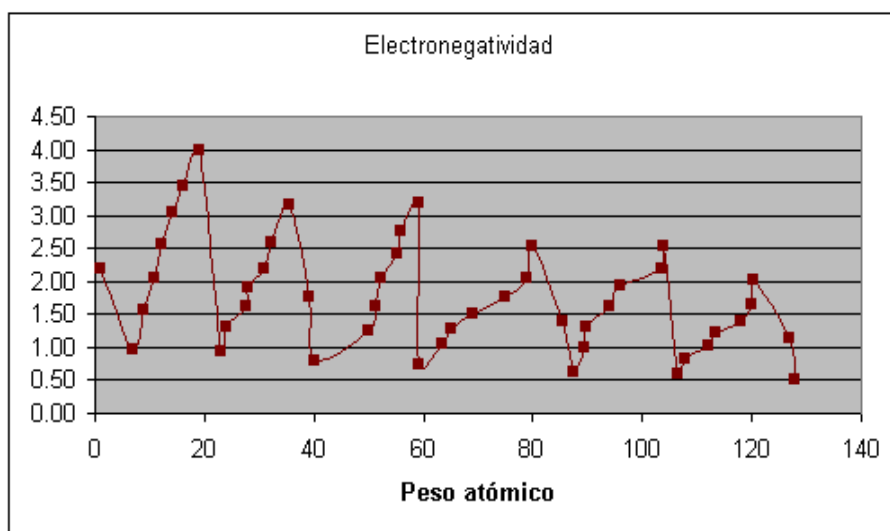
Las propiedades físicas y el peso atómico

Muchas propiedades físicas se conocían en ese momento, algunas desde tiempos anteriores, como los puntos de fusión y ebullición o la dureza; otras, medidas más recientemente, como el volumen atómico (para conocerlo había que conocer el peso atómico). Al colocarlas todas en unas tarjetas a la manera de cartas de naipes, Mendeleev ensayó múltiples combinaciones y fue viendo la regularidad escondida. Las dos gráficas que mostramos, con valores para la electronegatividad y para el radio atómico, representados en función del peso atómico, muestran la regularidad más importante observada por Mendeleev: las propiedades varían en forma casi periódica. Mendeleev se impresionó mucho con este resultado. La física había desarrollado ya la teoría de ondas, en la que se veía cómo complejos fenómenos como la luz y el sonido se podían describir en términos de ondas, para las cuales la ecuación más sencilla era del tipo:

$$y = A \sin (w t)$$



Lo interesante de esto era que las importantes propiedades del sonido y de la luz estaban encerradas en esa *Ley Periódica* que indicaba que al cabo de tanto tiempo se repetían las mismas amplitudes. Lo que se ponía ahora de presente era que una ley similar, si bien menos simple, se cumplía en el caso de todas las propiedades físicas de los átomos, en función de su peso atómico. Esta era la Ley Periódica para los átomos: "*Las propiedades de los átomos varían en función de su peso atómico, siguiendo una ley periódica*".



Estoy tratando de mostrar que mediante este trabajo Mendeleev dio una primera respuesta indiscutible a la discusión de tantos siglos: los distintos átomos de los distintos cuerpos no están hechos al azar, sino que siguen una misma ley. Las propiedades de todos están determinadas por su peso atómico, que resulta así ser la propiedad esencial y la única independiente. La diferencia entre las propiedades de una pareja cualquiera de elementos depende tan sólo de la diferencia entre las masas de sus átomos, de una manera simple y regular y, por lo tanto, empieza a aclararse que todos deben estar hechos de la misma materia prima y que al variar la cantidad de esta materia prima en un átomo, cambian sus propiedades de manera enteramente periódica.

La forma periódica de la variación de las propiedades sugería inmediatamente que los átomos homólogos de períodos sucesivos debían tener algo en común, y por eso resultaba interesante organizarlos, no en forma lineal a medida que el peso atómico aumentara regularmente, como en las dos gráficas anteriores, sino como una espiral en la que se viera la repetición de los períodos.

La espiral es difícil de dibujar, por eso es más fácil representarla como una sucesión de filas. A continuación se muestra una de tales disposiciones, razonablemente parecida a la que usó Mendeleev por primera vez y con un número ligeramente inferior de elementos. En cada casilla está indicado el peso atómico aceptado hacia 1865.

Las propiedades químicas y el peso atómico

Recalquemos que hasta este momento hemos venido siguiendo un argumento fundado en las propiedades físicas que, al fin y al cabo, se conocían desde hacía tiempo cuando Mendeleev hacía sus ensayos, y que eran susceptibles de una formulación matemática, de manera que no era tan extraño que siguieran una ley periódica como la que acabamos de mencionar. Las propiedades químicas, sin embargo, habían resultado ser algo mucho más difícil de manejar. Kant había asegurado hacia 1790 que la química nunca podría ser una ciencia, precisamente porque era imposible dar de ella una formulación matemática. La enorme variedad de que hemos hablado parecía demasiado complicada para poderla resumir en leyes matemáticas. Más cerca de Mendeleev, Augusto Comte, un filósofo francés muy influyente en su momento, organizador de las ciencias y autor de la visión positivista que dominó la filosofía de la ciencia en los siguientes cien años, había declarado tajantemente que era quimérico cualquier intento de explicaciones universales por una sola ley en química.⁶ Observemos entonces con atención la Tabla de Mendeleev; en ella está condensada, en una forma menos acostumbrada que la forma gráfica que usamos más arriba, la periodicidad de las propiedades físicas. Sin importar cuál sea la propiedad física que escojamos –una de las dos que representamos antes o cualquiera otra– lo importante es que hay *periodos*; que a medida que aumenta el peso atómico, algo se vuelve a repetir. Al ordenar los elementos químicos de esta forma, lo maravilloso es que los que quedan debajo de otros comparten con ellos propiedades químicas muy parecidas. En el extremo izquierdo encontramos los metales y en el derecho los no metales. A la izquierda vemos el Litio y debajo de él el Sodio, el Potasio y el Rubidio que son muy parecidos entre sí. A la derecha vemos Flúor, Cloro y Bromo, que también tienen propiedades químicas análogas. La propiedad química más interesante a mediados del siglo XIX, la que había permitido grandes avances por esos días, era la *valencia*, que representaba el poder que tiene cada átomo de unirse con otros o el número de átomos de Hidrógeno o equivalentes, que pueden unirse con el átomo en cuestión. En esos días se discutía mucho si lo anterior tenía sentido o no. La Tabla de Mendeleev, construida siguiendo la Ley Periódica en la representación, ordenaba perfectamente los elementos por valencias: los del extremo izquierdo tienen una valencia positiva, los del extremo derecho tienen una negativa, pero también pueden tener 1, 3, 5 o 7 positivas, como hacen los halógenos. En el centro están los tetravalentes Carbono y Silicio. Se podía decir mucho más y Mendeleev dijo mucho más en su momento.

Lo que quiero resaltar es que, al tomar la Ley Periódica y usarla como base para representar el conjunto de todos los elementos conocidos, este conjunto se ordenó de manera simple y natural. Ahora todos los elementos formaban familias en las cuales las propiedades físicas y químicas se organizaban armoniosamente, variando ordenadamente de un elemento al siguiente, permitiendo detectar familias, jerarquías y orden. El caos de la naturaleza estaba dominado y había dado paso a un orden armónico en la selva de elementos. Tres siglos antes de Mendeleev, Copérnico, Galileo y Kepler se habían maravillado de la organización armónica de los astros, encontrado que la miríada de estrellas que tan desordenadas parecen al ojo no entrenado que mira al cielo en una noche clara, en realidad hablaban de un orden estricto y riguroso, de órbitas planetarias que se repetían de manera precisa en movimientos periódicos, girando en torno al Sol central y en esa armonía encontraron las bases para levantar el maravilloso edificio de la astronomía y le dieron a Newton los elementos que necesitó para construir la física y, detrás de ella, la comprensión moderna de la naturaleza y la Revolución Industrial.

Ahora el caos primigenio, la sopa de tantos y tan variados componentes del mundo material, también estaba organizada; aparecía la evidencia clara de una periodicidad en lo más íntimo de la naturaleza: en el interior de los átomos, casi como si dentro de ellos se estuvieran viendo órbitas tan claras como las que se habían visto en el cielo.

La predicción por clasificación

Los entusiastas de la física clásica, de la obra de Galileo, Newton y los demás, sostienen que la prueba de su enorme poder y, para algunos, de su verdad, está en su gran poder de predicción. Si se conoce bien la situación del sistema en algún momento y se conocen las fuerzas que actúan sobre él, se puede predecir con certeza cómo estará en un momento futuro. Uno de los primeros triunfos espectaculares fue el obtenido por un amigo de Newton: Halley. Los cometas habían sido vistos desde la Antigüedad como signos ominosos en el cielo, como presagios de desgracias, precisamente porque eran anomalías que rompían la armonía. Cuando miramos las estrellas, como cuando miramos las nubes, tendemos a ver figuras dibujadas en el cielo, pero si las de las nubes cambian constantemente, las de las estrellas permanecen intactas y las podemos ver noche tras noche. Nosotros seguimos mirando las que vieron los babilonios y griegos soñadores: los Gemelos, el Toro, el Cangrejo, la Virgen, etc. Cuando dentro de esos patrones eternos aparecía una estrella nueva que nadie había visto antes era señal de que algo malo pasaba en el reino de los cielos y cuando algunos meses después desaparecía, todos se alegraban. Halley resolvió mirar con cuidado una de esas estrellas raras, especialmente brillante, y aplicar los métodos de cálculo de su amigo Newton para predecir cómo se comportaría. Su apuesta fue grande: en unos meses dejaría de verse, pero cada setenta y cinco años volvería a brillar en el cielo de idéntica manera a como la estaba viendo. Él no vivió para verla volver, pero su predicción se cumple desde entonces con toda regularidad. En el siglo XX la vimos en 1910 y en 1985. Volverá sin duda en 2060.

Miles de otras predicciones sobre cosas del cielo y de la Tierra han reforzado esta confianza en la Física de Newton y han hecho de la capacidad de predecir, piedra de toque de la calidad de una teoría, hasta el punto de haber sido considerada por algunos como criterio de demarcación entre lo que es científico y lo que no. Si se pueden escribir ecuaciones diferenciales y predecir la evolución de un sistema, la teoría correspondiente es científica; si no se puede, entonces no lo es. La epistemología ha dedicado mucha reflexión a esta suposición y sin embargo ha consagrado menos tiempo a pensar en otra forma de predicción –la predicción por clasificación, "*a la Mendeleev*"–, aun cuando sus resultados son más difíciles de obtener y bastante más novedosos. La historia reside en que, si observamos la Tabla anterior, ella está hecha en forma parecida a como lo hizo Mendeleev, con dos casillas vacías en la quinta fila. La confianza enorme en su Ley

Periódica llevó a Mendeleev a dejar estos dos huecos. Si hubiera colocado los elementos en sucesión, a partir de allí se habría perdido la hermosa regularidad y habrían dejado de estar los similares debajo de los similares. Él prefirió apostar a favor de la veracidad de su Ley Periódica y afirmar que debían faltar dos elementos. No sólo eso, sino que, apoyado en la misma confianza, predijo las propiedades físicas y químicas en función de los dos lugares vacíos en la tabla, haciendo las analogías con los que estaban contiguos en ella. Así predijo el comportamiento químico de los elementos, el tipo de mineral en el que se podían encontrar y, en fin, la mayoría de sus propiedades. Sabiendo cómo y dónde buscar, los dos elementos, el Galio y el Germanio, fueron encontrados muy pronto y se vio que sus propiedades eran casi idénticas a las predichas por el químico ruso.

Este análisis de la capacidad de predicción está directamente ligado con el de la matematización de la ciencia. Con frecuencia los epistemólogos se han concentrado en el problema de la matematización, directamente relacionada con la escritura de ecuaciones diferenciales, como se hacía en la mecánica clásica. El conjunto de las sustancias químicas parece más bien ser un espacio topológico en el cual las relaciones de pertenencia a una clase, de vecindad o relación jerárquica de clases, etc., son más importantes que las diferenciales. Ésta parece ser la estructura matemática presente detrás de la Tabla Periódica y la que explicaría que la predicción se hizo posible cuando se consideró el conjunto de todos los elementos y las clases de equivalencia entre ellos. La epistemología de este problema se encuentra inexplorada y su interés no sólo residiría en la comprensión de ese evento mayor de la historia de la química que fue la formulación de la Ley Periódica, sino en la posible generalización de esta forma de hacer ciencia a las sustancias compuestas. Schummer⁷ enuncia dicho problema como el de la estructura lógica del conocimiento químico.

La ley periódica: un microscopio poderoso

La Ley Periódica –la ley universal de la variación periódica de las propiedades de los elementos en función del peso atómico– fue una poderosa herramienta de predicción que permitió hallar elementos nuevos, pero, sobre todo, mostró que había una armonía en los átomos constituyentes de los elementos, una relación de orden entre ellos y una necesaria estructura interna que daba cuenta de este orden. En esa forma zanjó la polémica milenaria: tanta regularidad tenía que ser prueba de armonía interna, no podían mostrarla átomos hechos al azar. Debía haber una materia prima única o unas pocas organizadas en los distintos átomos. Poco tiempo después de la primera publicación de la Tabla hecha por Mendeleev, se descubrieron los gases nobles y, a pesar de no haber sido sospechada su existencia previamente, encajaron perfectamente en la Tabla, como lo han hecho todos los demás elementos descubiertos desde entonces, hasta encajar en la versión contemporánea similar a la que mostramos en la página anterior, confirmando la validez general de la Ley Periódica. En ella se ve perfectamente la armonía de la naturaleza en el nivel atómico, afín a la "*armonía de las esferas*" que encontró Kepler en el sistema solar: los átomos van acumulando "*algo*" a medida que aumenta el peso atómico. Este algo se coloca de cierta manera en los primeros dos elementos, luego se coloca de ocho en ocho en los siguientes dos períodos, en los cuales cada ocho elementos se repiten todas las propiedades. La repetición siguiente es de 18 en 18 y luego de 32 en 32. La fórmula para la longitud de cada período es muy sencilla: $2n^2$. En esta simplicidad y elegancia se apoyó la convicción de que se había encontrado la manera de organizar la naturaleza en el nivel elemental. Lo único que faltaba era hallar los ladrillos que con tan preciosa regularidad servían para construir los átomos. En 1897 John Joseph Thomson encontró el electrón y se dio cuenta de que la misma partícula podía ser extraída de cualquier átomo, sin importar su naturaleza. Muy pronto se entendió que éste era el elemento esencial. Menos de cinco años habían pasado cuando Gilbert Newton Lewis, el gran químico norte-americano, construyó su primer modelo de átomo, organizando los electrones de ocho en ocho en los vértices de cubos concéntricos. Un par de años después, Thomson mismo construyó un modelo con los electrones en círculos concéntricos dentro de un mar de carga positiva. Cuando en 1911 el alumno de Thomson, Ernest Rutherford, imaginó sus átomos como minúsculos sistemas planetarios, abriendo el camino hacia la ciencia atómica del siglo XX, no había sino enfocado mejor la imagen que estaba ya latente en la Tabla de Mendeleev. De ahí en adelante se pudo explorar intensamente el interior del átomo. El camino se podía recorrer porque se contaba con el mapa, y el mapa fue esa sencilla tablita resultante de casi veinte años de trabajo y paciencia de Mendeleev, que nos permitió por primera vez entrever el interior del átomo.

NOTAS

1 Villaveces J. L. "Química y Epistemología: una relación esquivada", *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*. Vol. 1. Nos. 2 y 3. 2000. pp. 9-26.

2 ACAC es la sigla de la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia. Esta asociación tiene múltiples programas para apoyar el avance de la ciencia en Colombia. Uno de ellos se llama "Encuentro con el futuro", conferencia que suele dictarse los sábados en el auditorio León de Greiff de la Universidad Nacional de Bogotá, en la cual se tocan temas de interés general científico para auditorios de más de dos mil personas, principalmente bachilleres y docentes escolares.

3 Todavía hoy forma parte de la base conceptual de nuestros escritores de horóscopos, que atribuyen a los signos zodiacales combinaciones entre estos cuatro elementos y hablan de signos de tierra, signos de agua, etc. Es interesante y debería ser objeto de análisis el que nuestros medios de comunicación, que tan poca atención prestan a la ciencia moderna, sí se interesan mucho por tener secciones zodiacales, astrológicas, de tarot y otras formas del conocimiento medieval, generalmente manejadas por aficionados.

4 Lucrecio, "*De rerum natura*" (De la naturaleza). Este libro es el texto más completo de ciencia natural escrito en la antigüedad y ha llegado a nosotros. Hay una hermosa y fácil de conseguir edición bilingüe castellano-latín, publicada por Bosch, de Barcelona, en 1985, amén de varias ediciones diferentes en castellano.

5 La formación de ácidos por la acción del oxígeno era considerado lo más típico del oxígeno. De hecho, el nombre "oxígeno" que le puso Lavoisier a este gas quiere decir en griego "formador de ácidos". Un ejemplo típico es la formación de ácido sulfúrico cuando se combinan azufre y oxígeno. En términos modernos: $S + 3O_2 \rightarrow 2SO_3$, llamado hace doscientos años ácido sulfúrico. Hoy le decimos ácido sulfúrico sólo cuando se ha disuelto en agua, con la cual reacciona: $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$.

6 A. Comte *The Positive Philosophy* (1853). Otras frases de Comte son: "La química es una erudición, no una ciencia y los químicos deben estudiar taxonomía, no física". La química no puede ser reducida a las matemáticas, eso "sería profundamente irracional" y "contrario a la naturaleza de los fenómenos".

7 Schummer J. (1998). *The Chemical Core of Chemistry I: A Conceptual Approach*. HYLE, Vol. 4 (1998), No. 2, pp. 129-162. (HYLE. *An International Journal for the Philosophy of Chemistry* se consigue en versión electrónica: <http://www.uni-karlsruhe.de/~philosophie/hyle.html>).