

# Los ocho elementos de la mina de Ytterby

Plinio Sosa Fernández\*

## Resumen

La mina de Ytterby, a 15 km de Estocolmo, Suecia, es el lugar donde se descubrió el mayor número de elementos químicos: ¡ocho! En este trabajo, se platica la historia de estos descubrimientos, se hace un pequeño resumen de las distintas técnicas que se han utilizado a través de la historia para descubrir y aislar los elementos, se muestran las maravillosas aplicaciones de estos ocho elementos y, a partir de ellas, se repasan algunos fenómenos físicos y químicos involucrados en dichas aplicaciones.

## Introducción

Los elementos químicos se fueron descubriendo y aislando, poco a poco, a lo largo de toda la historia de la humanidad. Esto ocurrió en distintas partes de nuestro planeta e inclusive, alguno (el helio), fuera de él. Sin embargo, la mina de Ytterby –localizada 15 km al noreste de Estocolmo, en la isla Resarö, en Suecia– posee el récord del mayor número de elementos encontrados en el mismo lugar:

Itrio, <sub>39</sub> Y <sup>I</sup>	Gadolinio, <sub>64</sub> Gd	Terbio, <sub>65</sub> Tb	Holmio, <sub>67</sub> Ho
Erbio, <sub>68</sub> Er	Tulio, <sub>69</sub> Tm	Iterbio, <sub>70</sub> Yb	Lutecio, <sub>71</sub> Lu

De estos ocho elementos, dos pertenecen al grupo tres de la Tabla Periódica, seis al grupo de los lantanoides; y los ocho forman parte de esa agrupación informal conocida como las *Tierras raras*. Los miembros de este conjunto, aparte de ser muy parecidos todos entre sí, son elementos sumamente versátiles con diversas propiedades que hace que tengan grandes y variadas aplicaciones: aleaciones, imanes, láseres, isótopos radiactivos, escudos de neutrones, etcétera.

A partir de estos ocho elementos, se repasan algunos fenómenos físicos y químicos que explican algunas de las interesantes aplicaciones que muestran las Tierras raras.

## Antecedentes

En 1869, el químico ruso Dimitri Mendeleev cristalizó la idea de varios otros investigadores, contemporáneos suyos, acerca de cómo agrupar a los elementos químicos conocidos en aquella época. En vez de una simple lista de elementos ordenados de forma creciente por su masa atómica fue más conveniente acomodarlos en una tabla, es decir, en un esquema de dos dimensiones.

Y eso fue porque en esa lista, por cada cierto número de elementos había uno que se parecía químicamente a otro de los anteriores.

I. El subíndice, abajo a la izquierda del símbolo químico del elemento, refiere al número de protones en el núcleo. Lo que distingue a un elemento de otro es su número de protones. El número de protones es directamente el número de la casilla que ocupa el elemento en la Tabla periódica. Por eso se llama *número atómico*.

Por ejemplo, el octavo se parecía al primero, el noveno al segundo, el décimo al tercero y así sucesivamente.

Este arreglo bidimensional es útil porque todos los elementos parecidos químicamente quedan en las columnas de la Tabla. Sin embargo, esto no es así para los lantanoides ni para los actinoides. Estos dos grupos no son verticales... ¡sino horizontales! Se parecen –pero muchísimo– todos los del mismo renglón, aún estando en distintas columnas.

Los lantanoides junto con lo actinoides son el dolor de cabeza de la Tabla Periódica. En primer lugar, porque conforman el Bloque F que debería estar entre el Bloque S (las primeras dos columnas) y el Bloque D (de la tercera columna en adelante). Pero si así se hiciera, si se colocara donde le corresponde, la Tabla Periódica no podría tener las proporciones de una hoja tamaño carta. Por eso, lo que se ha hecho es colocar el Bloque F, hasta abajo, aislado del resto de la Tabla Periódica.

Los lantanoides también forman parte de un grupo informal e histórico que no tiene nada que ver con la Tabla Periódica: las *Tierras raras*. Son todos los lantanoides y tres elementos del Bloque D: el escandio, el itrio y el lutecio. En este contexto, la palabra *tierra* es una denominación antigua que se usaba para referirse a los óxidos. Y el calificativo de *raras* no se refiere a escasas, sino a que son muy difíciles de aislar de los minerales donde se les encuentra. O sea que las tierras raras ni son un grupo de la Tabla Periódica, ni son tierras, ni son escasas: son óxidos de distintos elementos muy difíciles de separar.

## Los descubrimientos

### El itrio

En 1794, el químico finlandés Johan Gadolin recibió, una muestra para analizar de un mineral negro que se había encontrado en la mina de Ytterby. De ahí, logró separar una fracción (a la que llamó *itria*) de donde obtuvo el óxido de un nuevo elemento mediante reacciones químicas, el cual era desconocido hasta entonces. Lo llamó *itrio*. Más tarde, en 1800, al mineral en donde se encontró al itrio se le dio el nombre de *gadolinita* en honor a Johan Gadolin.

### El terbio

Pero la historia no acabó ahí. En 1843, el químico sueco Carl Mosander, dividió la Gadolinita en tres fracciones. De la primera (la que contenía el óxido de itrio encontrado antes por Gadolin), Mosander obtuvo el óxido de un nuevo elemento: el óxido de terbio.

\* Facultad de Química, Departamento de Química Inorgánica y Nuclear, Universidad Nacional Autónoma de México.

\* plinio@unam.mx

### El erbio, el holmio y el tulio

De la segunda fracción, se obtuvieron tres nuevos elementos: el erbio (por el propio Mosander también en 1843) y el holmio y el tulio por el químico sueco Per Theodor Cleve, varios años después, en 1879.

### El gadolinio

En 1880, el químico suizo Jean de Marignac pudo aislar, de la maravillosa gadolinita, el óxido de un nuevo elemento al que nombró gadolinio, en honor al gran Johan Gadolin.

### El iterbio y el lutecio

De la tercera fracción, otro tanto de años después, en 1907, el químico francés Georges Urbain obtuvo dos nuevos elementos: el iterbio y el lutecio.

Excepto el del gadolinio, los nombres de los otros siete elementos son nombres geográficos:

- Itrio, terbio, erbio e iterbio están claramente relacionados con la maravillosa mina de Ytterby.
- Holmio es por Estocolmo.
- Tulio procede del antiguo nombre de Escandinavia en latín, Thule.
- Lutecio, del latín *Lutetia* que fue primer nombre de París.

### Las técnicas analíticas para descubrir los elementos

A lo largo de la historia, el *Homo sapiens sapiens* ha empleado diversas maneras para descubrir y obtener los distintos elementos químicos.

De los primeros elementos descubiertos no hay un registro histórico de quiénes ni cómo los descubrieron. Muy probablemente una combinación de alguna casualidad seguida de muchos años o siglos de mejoras empíricas. Quizá los antiguos encontraron el producto de la reacción de una roca con el carbón de una hoguera encendida. Y luego, de generación en generación, fueron desarrollando y aprendiendo las recetas, las herramientas y las condiciones que permitieron optimizar la obtención de dichos elementos.

Luego, a partir de la consolidación de la química como una nueva ciencia, se usaron las técnicas clásicas de la química: agregar algún ácido para formar una sal soluble en agua y después hacer reaccionar esta sal con alguna sustancia reductora para obtener la sustancia elemental tal cual.

Más tarde vino, como un regalo de la física a la química, la espectroscopía. Esto permitió detectar nuevos elementos sin tener que usar la química. La muestra sospechosa de contener un nuevo elemento se sometía directamente a la acción del fuego. La flama que se generaba al quemarse la muestra emitía una luz que luego era pasada a través de un prisma. Lo que se obtenía era un espectro de líneas que era como la huella digital de cada elemento.

Para los elementos más difíciles de obtener, la química generó técnicas todavía más sofisticadas: la cristalización fraccionada, la destilación fraccionada y el intercambio de iones.

Las tierras raras se separan así, por intercambio de iones: toda la mezcla de tierras raras se hace pasar a través de una resina. La resina retiene los cationes de los distintos óxidos a diferentes velocidades, lo cual permite irlos sacando de la resina, por separado, uno por uno.

Para los elementos que no se hallan en la naturaleza, vino otro regalo de la física: la química nuclear.

### Aplicaciones

Los ocho elementos de la mina de Ytterby tienen muchísimas aplicaciones. Esas aplicaciones pueden ser ópticas (Opt), magnéticas (Mag), electrónicas (Elec), nucleares (Nuc), médicas (Med) o mecánicas (Mec).

Entre las ópticas se cuentan la fabricación de láseres (Ls), de equipos portátiles de rayos X (Rx), de fibras ópticas (Fo), de pantallas a color (Co), de pantallas fluorescentes y de equipos para imagenología por resonancia magnética (Rm).

Entre las magnéticas están la fabricación de imanes (Im), de cerámicos magnéticos (Cm), de superconductores (Sc) y, obviamente, de equipos para imagenología por resonancia magnética.

Entre las electrónicas se tienen la fabricación de superconductores, de chips electrónicos (Ch) y de equipos para imagenología por resonancia magnética.

**Tabla I.** Aplicaciones de los ocho elementos de Ytterby.

E	Ópt				Mag				Elec			Nuc			Méd					Mec
	Ls	Rx	Fo	Co	Cm	Sc	Im	Rm	Sc	Ch	Rm	Ca	Ne	Ct	Ca	Ls	Rx	Rm	Ct	Al
<sup>39</sup> Y	✓								✓			✓				✓				
<sup>64</sup> Gd				✓						✓			✓						✓	
<sup>65</sup> Tb				✓			✓			✓										
<sup>67</sup> Ho	✓			✓				✓								✓		✓		
<sup>68</sup> Er			✓	✓									✓							✓
<sup>69</sup> Tm	✓	✓			✓	✓									✓	✓	✓			
<sup>70</sup> Yb	✓	✓													✓	✓	✓			✓
<sup>71</sup> Lu								✓							✓			✓		

Entre las aplicaciones nucleares aparecen isótopos para irradiar células cancerosas (Ca), para elaborar soluciones de contraste (Ct) y como escudo de neutrones (Ne) en las plantas nucleares.

Entre las aplicaciones médicas están, como es de esperarse, los isótopos para combatir el cáncer, los láseres para cirugía, los equipos portátiles de rayos X y los equipos para imagenología por resonancia magnética.

Finalmente, entre las aplicaciones mecánicas, está la fabricación de aleaciones (Al) con mejores propiedades que las que tienen sustancias metálicas solas.

En la **Tabla I**, se muestra un resumen de las aplicaciones de los ocho elementos de Ytterby.

## Los fenómenos que dan lugar a estas aplicaciones

### Ópticos

En el mundo cuántico, el del interior de las partículas químicas (los átomos, los iones y las moléculas), no todos los estados energéticos son posibles. Para pasar de un estado a otro, se tiene que absorber o emitir una cantidad exacta de energía. En las partículas químicas, los electrones (negativos) y los núcleos (positivos) se atraen mutuamente. En un estado de baja energía, un electrón está en promedio más cerca del núcleo que en un estado de alta energía. Así, cuando una partícula absorbe un fotón con energía exactamente igual a la diferencia de energía entre los dos estados, el electrón pasa del estado de baja energía al de más alta energía, donde se encontrará, en promedio, más alejado del núcleo. Debido a la atracción eléctrica que el núcleo ejerce sobre el electrón, esta situación no puede durar mucho: en un tiempo brevísimo, del orden de los femtosegundos, el electrón se regresa al estado donde se encontraba originalmente. Y, espontáneamente, emite la misma cantidad de energía que había absorbido, es decir, un fotón idéntico al original. Se trata, pues, de una *emisión espontánea*.

Las sales de  $\text{Er}^{3+}$  emiten una luz de color rosa<sup>2</sup>. Mientras que las de  $\text{Tb}^{3+}$  emiten una luz de color verde. Estas últimas, junto con las sales de  $\text{Eu}^{3+}$  y  $\text{Tm}^{3+}$ , que emiten luz roja y luz azul respectivamente, forman parte de la tecnología de luz tricromática en la iluminación de interiores y en la emisión de los colores primarios en pantallas de televisión. También se usan en láseres y en lámparas fluorescentes.

En los láseres, el fenómeno es similar. Resulta que, en ese pequeño instante en el que la partícula se encuentra en un estado de mayor energía, otro fotón puede hacer que un electrón caiga del nivel superior al inferior, emitiendo un nuevo fotón. Este fotón coincide exactamente con el fotón original en longitud de onda, fase y dirección. Se trata, pues, de una *emisión estimulada*.

El primer fotón sigue su trayectoria original sin ningún problema. Para fines prácticos, se duplicó el número de fotones. Estos a su vez pueden estimular la emisión de otros dos fotones. Y esos cuatro, la de otros más y más y más. Es decir, se amplifica la señal.

La palabra *láser* es un acrónimo de la frase en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).

Los láseres se utilizan en impresoras láser, en unidades de discos ópticos, en instrumentos de secuenciación de ADN, en escáneres

de códigos de barras, en la fabricación de chips semiconductores, en la cirugía láser, en la fabricación de fibras ópticas y en materiales de corte y soldadura, por ejemplo.

### Magnéticos

Los elementos de una misma columna se parecen porque tienen el mismo número de electrones disponibles en la última capa. En cambio, en los renglones, la cantidad de electrones disponibles va variando de uno en uno. Cada vez que nos movemos un lugar a la derecha, ese elemento tiene un electrón más que el anterior.

Los electrones son pequeños electroimanes. Además de su movimiento angular alrededor del núcleo, tienen un movimiento angular intrínseco el llamado *espín electrónico*.

El cómo se distribuyen los electrones alrededor de un núcleo depende de dos principios físicos: la ley de Coulomb y el principio de exclusión de Pauli.

El primero dice que las cargas iguales se repelen. Y el segundo señala que, por ejemplo, dos electrones con el mismo espín se excluyen mutuamente de una misma región del espacio (aunque no hay ninguna restricción para que dos electrones de espines opuestos estén en la misma región del espacio).

Solo hay dos tipos de espines: los que apuntan en una dirección y los que apuntan en la dirección opuesta.

Estos dos principios, actuando simultáneamente, provocan dos cosas:

- Que los electrones se acomoden por capas y
- Que en una misma región del espacio solo pueda haber, como máximo, dos electrones (ambos con espines opuestos). Se dice que son *electrones apareados*.
- Un tercer electrón no podría estar en la misma región porque o tiene el espín de uno de los electrones que ya está allí o tiene el del otro.

Cuando hay la mitad o menos de la mitad de los electrones que caben en una misma subcapa, todos los electrones se ubican en distintas regiones y todos con el mismo espín. Puede ser todos hacia arriba o todos hacia abajo, pero —eso sí— todos con la misma orientación. Se dice que son *electrones desapareados*.

Toda carga eléctrica, al girar, genera un campo magnético. Los electrones en consecuencia son los imanes más pequeños del mundo. Si tenemos muchos electrones desapareados, sus momentos magnéticos se suman y tienen propiedades magnéticas apreciables.

Eso es lo que pasa con los elementos de los bloques más anchos de la tabla el Bloque D y el Bloque F: suelen tener muchos electrones desapareados y, por tanto, un momento magnético considerable.

El del gadolinio es un caso especial. Es ferromagnético debajo de los 19 °C y paramagnético arriba de esta temperatura. Que un material sea ferromagnético significa que puede ser atraído por un imán. En cambio, un material paramagnético no es atraído por un imán, aunque sí se puede imantar. Es decir, en tiempos fríos, el gadolinio sí es atraído por un imán. Pero, en primavera o en lugar muy caluroso, para nada es atraído por los imanes.

Y es que el  $\text{Gd}^{3+}$  posee la mayor cantidad de electrones no apareados posible: siete. Y esta característica es justamente la que más se aprovecha para sus principales aplicaciones

---

2. El *tres más* significa que la partícula no es neutra, que está cargada eléctricamente. Quiere decir, también, que tiene tres electrones menos que un átomo del elemento correspondiente que, ese sí, es neutro.

## Radiación nuclear

A pesar de lo que nos indican nuestros sentidos, las sustancias no son una pasta continua de materia. Más bien consisten en un gran número de pequeñísimas partículas separadas unas de otras: los átomos, los iones y las moléculas. Y estas partículas, a su vez, poseen una naturaleza eléctrica: tienen partes positivas (los núcleos) y partes negativas (los electrones).

Los núcleos son positivos porque contienen dos tipos de subpartículas: los protones (que son los que portan la carga positiva) y los neutrones (que no tienen carga). Todas ellas se mantienen unidas gracias a las poderosísimas fuerzas de atracción nucleares. Sin embargo, estas fuerzas nucleares compiten con las fuerzas de repulsión eléctricas que se dan entre los protones. Por eso, al aumentar el número de protones, disminuye la estabilidad de los núcleos. La presencia de los neutrones, en cambio, ayuda a que los núcleos sean estables: participan en la atracción nuclear y debilitan la repulsión eléctrica.

Sin embargo, todo tiene sus límites: el último elemento con un núcleo estable es el bismuto. A partir del polonio, todos son radiactivos. Es decir, sus núcleos no son estables, se rompen, se desintegran emitiendo algún tipo de radiación (partículas alfa, partículas beta o rayos gama).

A pesar de ello, el polonio y los siguientes ocho (hasta el uranio) existen en nuestro planeta. Todos los demás, del 93 al 118, son orgullosamente terrícolas: hechos por nosotros los seres humanos.

Un mismo elemento puede tener núcleos con el mismo número de protones (obviamente), pero con distinto número de neutrones. Algunos serán estables y otros, no.

El iterbio tiene siete isótopos estables: el 168, el 170, el 171, el 172, el 173, el 174 y el 176. La palabra *isótopos* viene del griego: *isos*, igual y *topos*, lugar. Es decir: los que ocupan el mismo lugar. ¿Lugar de qué o de dónde? Pues de la Tabla Periódica. O sea, son isótopos entre sí, aquellos que ocupan el mismo lugar en la tabla periódica.

El iterbio es el septuagésimo elemento. Por ello, se ubica en la casilla número 70. Y eso quiere decir que tiene 70 protones en su núcleo. Lo que distingue a un elemento de otro es su número de protones. El número de casilla es directamente el número de protones de cada elemento.

Entonces esos siete isótopos del iterbio, ¿qué son? Son distintas variedades de átomos de iterbio. Y, ¿en qué son diferentes? En el número de neutrones que tienen en su núcleo. Todos tienen 70 protones, pero diferente número de neutrones. Y, ¿qué es el número que siempre se menciona cuando se habla de isótopos? Es la suma de protones y neutrones. Por ejemplo, el iterbio-170 tiene 100 neutrones y 70 protones.

## Conclusiones

Los elementos descubiertos en la mina de Ytterby son un bonito ejemplo de cómo funciona la ciencia: ocho elementos químicos obtenidos del mismo mineral, en el mismo lugar, durante un período larguísimo de más de 100 años (de 1792 a 1907) con la participación de muchos investigadores de distintas épocas y la implementación de distintas técnicas analíticas, cada vez más sofisticadas y eficientes. Así es la ciencia.

La experiencia lleva a nuevas técnicas. Las técnicas conducen a nuevos saberes. Y estos saberes nos llevan a nuevas técnicas que, a su vez nos conducen a más experiencia. Y así sucesivamente: la adquisición del conocimiento es esa incesante carrera de relevos entre experiencia, técnica y saberes.

## Referencias

1. Gray, T. *Los Elementos. Una exploración visual de todos los átomos que se conocen en el universo*. Silver Dolphin, Nueva York, 2009.
2. Parsons, P.; Dixon, G. *The Periodic Table. A visual guide to the elements*. Quercus Editions Ltd, Londres 2013.
3. Scerri, E. *The Periodic Table. Its story and its significance*. Oxford University Press, Inc., New York, 2007.
4. Scerri, E. *El pasado y el futuro de la tabla periódica*. Educación Química, 19, 3 (2008), 234–241.
5. Sosa, P. *Elemental, mi querido Watson*. Horizontes, 5, 10, (2000), 35–39.
6. Sosa, P. *Conceptos base de la Química. Libro de apoyo para bachillerato*. Dirección General del Colegio de Ciencias y Humanidades, UNAM, Ciudad de México, 2007.