

Esta serie rescata algunos temas didácticos para ayudarse en la exposición de cada uno de los elementos químicos en un curso de Química General o de Química Inorgánica.

Oro

Plinio Sosa*

La edad del oro

¡Qué indiscreción! Empezar preguntando la edad... Y peor si el susodicho es realmente viejo. ¿Cuánto le echan? ¡Hagan sus apuestas! ¿5 mil años? ¿10 mil? ¿100 mil? ¿un millón? ¿100 millones? Fríos, fríos... ¡congelados!

El oro, como todos los elementos después del hierro, se produce en el corazón de las estrellas. Éstas pasan la mayor parte de su vida transformando hidrógeno en helio. La energía que se libera de este proceso sirve para contrarrestar el efecto de la atracción gravitacional hacia el interior de las estrellas. Cuando el hidrógeno se agota, la estrella se transforma en una gigante roja y un nuevo proceso nuclear se inicia: la captura de núcleos de helio (partículas α). Durante este proceso se forman todos los núcleos con un número par de protones¹: carbono, oxígeno, nitrógeno, así hasta el hierro. Cuando se acaba el helio, ya no hay manera de contrarrestar la fuerza de gravedad, e inevitablemente la estrella se colapsa sobre sí misma. En este pequeñísimo instante cósmico —¡qué digo!, en este súper-ultra-pequeñísimo instante—, ocurre otro tipo de reacción nuclear: la captura de neutrones. El hierro (con 26 protones) captura neutrones hasta hacerse inestable y transformarse en cobalto (con 27 protones). A su vez, el cobalto captura neutrones para transformarse en níquel y luego éste en cobre, y así sucesivamente hasta el uranio. Si la estrella es muy masiva, explota en una supernova, esparciendo en el medio interestelar todos sus componentes. Así, las oportunidades para que se forme el oro son más bien escasas.

El oro terrestre, por lo tanto, es muy pero muy viejo. Fue sintetizado por varias generaciones de estrellas masivas desde hace 12 mil millones de años hasta hace 4 mil 500 millones de años (que es aproximadamente cuando se formó nuestro sistema solar).

*Facultad de Química, UNAM, Ciudad Universitaria, México, D. F. 04510, Correo electrónico: plinio@servidor.unam.mx
Recibido: 20 de enero de 2004; **aceptado:** 23 de marzo de 2004.

¹ El número de protones de un núcleo se denomina *número atómico* y se representa mediante la letra *z*.

¿Dónde hay oro?

Si se quiere mucho pero muchísimo oro, a donde hay que ir es, sin duda, al centro de la Tierra. Poco después de haberse formado nuestro planeta, los elementos más densos, como el hierro y el níquel, se acumularon en el centro formando un denso núcleo metálico; mientras que los menos densos (silicio, oxígeno, aluminio, etcétera) formaron una especie de “nata” que rápidamente se solidificó dando lugar a la corteza terrestre. El oro, siendo muy afín al hierro, fue secuestrado por éste hacia el núcleo. En la corteza no se conservaron más que trazas: ¡0.001 gramos de oro por cada tonelada de corteza terrestre!

Para formar yacimientos y poder ser explotado, el oro tuvo que ser concentrado miles de veces por los procesos geológicos.

Todos hemos visto en las películas al solitario gambusino recorriendo los ríos en busca del ansiado oro. Sin embargo, el oro no se formó ahí en los ríos sino en los yacimientos primarios, éstos sí provenientes directamente de los procesos geológicos. Los viejos aluviones donde se acumula el oro en forma de pepitas no son más que inmensos receptáculos del oro liberado por la erosión de los yacimientos primarios. Así, los yacimientos **aluviales** son muy importantes ya que representan más del 60% de las reservas mundiales de oro conocidas.

Hay dos tipos de yacimientos primarios:

- Los **magnéticos**, estrechamente asociados a la génesis del magma,
- y los **orogénicos**, ubicados en las cadenas montañosas formadas debido a la colisión de dos continentes. Ente-



Figura 1. Ternero de oro alrededor de 2500 a.C. II Dinastía de Ur.



Figura 2. Tesoro de Taironas.



Figura 3. Cofre encontrado en una tumba en Varghina, Macedonia, hace 2,300 años.

rrados profundamente en la corteza terrestre, son, sin lugar a dudas, los menos conocidos.

Los yacimientos de oro de nuestro planeta se formaron en cuatro momentos de la historia:



Figura 4. Collar con forma de luna creciente hecha por algún artesano irlandés 2,000 años a. C.

- en el Arcaico (entre hace 3 mil y 2,500 millones de años);
- en el Protozoico inferior (hace alrededor de 2 mil millones de años);
- en el Paleozoico (hace 300 millones de años)
- Y, finalmente, en el Cenozoico (hace 20 millones de años).

¿Cuánto queda?

Se estima que desde el principio de la actividad humana, alrededor de 145 mil toneladas de oro han sido extraídas de la tierra.² De éstas, cerca de 35 mil toneladas se encuentran almacenadas en las bóvedas de los bancos centrales. Más o menos la misma cantidad “duerme” dentro de innumerables cajas fuertes de ahorradores particulares. El resto se en-

² Un poco más que un cubo de... ¡19 m de lado!

cuentra inmovilizado en forma de objetos, principalmente joyas, o perdido en el fondo de los océanos.

Dos terceras partes de la producción mundial provienen de Sudáfrica. Las reservas conocidas son del orden de 100 mil toneladas. En promedio, se extraen unas 2,500 toneladas por año. Es decir, a este ritmo todavía tenemos unos 40 años para colocarnos la mochila de explorador, conseguir un buen detector de metales (no estaría demás una linda chica que nos acompañara en nuestra aventura) y lanzarnos a la noble empresa de volvernos multimillonarios.

Aunque, en realidad, no es necesaria tanta ansiedad: ¡la corteza terrestre debe contener miles de millones de toneladas de oro! Sin embargo, hay que tener en cuenta que la parte explotable (cuyo costo de producción es inferior al precio del oro) no debe rebasar el millón de toneladas.

¿Cómo se extrae?

La forma más fácil es aprovechando la enorme densidad del oro (19.2 g/cm^3) comparada con la de los minerales que lo acompañan (entre 2 y 2.5 g/cm^3). En una bandeja con forma de cono se coloca la tierra que contiene oro, se agrega agua y luego, se mueve la bandeja con un movimiento circular similar al de una centrífuga. De este modo, las sustancias más densas —en este caso, el oro— se van al fondo de la bandeja. Sin detener el movimiento, el agua, junto con los demás materiales menos densos, se desecha.

Esta técnica, que no permite recuperar las partículas de oro más finas, fue sustituida por la *amalgamación* desde el siglo XIX. El oro y el mercurio se pueden mezclar dando lugar a un material con aspecto homogéneo llamado amalgama.³ Así, al agregar mercurio se puede atrapar todo el oro. Luego se calienta la amalgama y ambos metales (uno sólido, el oro, y otro líquido, el mercurio) se separan mediante una especie de filtración. Este procedimiento ya no se utiliza más que en las producciones artesanales debido a la neurotoxicidad del mercurio (provoca lesiones nerviosas irreversibles).

Desde finales del siglo XIX, el proceso que se utiliza para la explotación industrial es la *cianuración*. El mineral se tritura y luego se mezcla con una solución de cianuro de sodio (NaCN). Una vez en contacto, el oro y el cianuro de sodio reaccionan para dar un compuesto de coordinación, el dicianoaurato

³ Las mezclas homogéneas de metales se llaman *aleaciones*. Técnicamente son disoluciones sólidas. Las aleaciones que contienen mercurio se llaman *amalgamas*.

de sodio, $\text{Na}[\text{Au}(\text{CN})_2]$ que es una sustancia iónica soluble en agua.⁴ Finalmente, el oro se recupera mediante otra reacción química: una electrólisis! Al aplicar electricidad a la solución acuosa, el dicianuro de sodio se descompone, siendo uno de sus productos nuestro preciadísimo oro. En algunos minerales sulfurados, el oro se encuentra atrapado entre los cristales de pirita o de arsenopirita y, entonces, no puede reaccionar con el cianuro de sodio. Los minerales son “horneados” a 650°C , de tal modo que los sulfuros metálicos reaccionan con el oxígeno del aire y se forman los óxidos correspondientes. Entonces, el oro se libera y ya puede ser cianurado. También, los minerales sulfurados pueden dárseles como “pastura” a los tiobacilos, unas bacterias capaces de digerir los sulfuros y, por lo tanto, de liberar el oro. A este proceso se le llama *biolixiviación*.

Aunque la cianuración es muy eficaz, también es muy peligrosa. El ion cianuro, CN^- , es sumamente tóxico. Inhibe la síntesis de la enzima que permite la coordinación del oxígeno al hierro de la hemoglobina. Pequeñas cantidades de cianuro provocan la muerte por asfixia.

Usos del oro

En primer lugar, el oro se ha usado en la orfebrería, la joyería y la decoración. El oro, junto con el cobre, es uno de los dos metales primero utilizados por el hombre. Disponible en la naturaleza en su estado nativo y siendo muy maleable y dúctil,⁵ el oro se pudo utilizar y trabajar sin necesidad de ningún tratamiento metalúrgico preliminar. Los objetos de oro más antiguos datan de mediados del quinto milenio a. de C. Se trata de cerca de tres mil objetos martillados o trabajados mediante la técnica del repujado, encontrados en la necrópolis de Varna, a orillas del Mar Negro.

Más objetos de oro aparecieron esporádicamente en Mesopotamia al final del quinto milenio y en Irán en el cuarto milenio. Sin embargo, fue hasta el tercer milenio, que una verdadera orfebrería se desarrolló en estas regiones (las tumbas reales de Ur, en Irak, por ejemplo) así como en Egipto. Las técnicas, en este periodo, ya fueron más elaboradas incluyen-

do diversos procedimientos de soldadura. En esta época, también, fue cuando se instauró un verdadero comercio del oro a partir de las regiones productoras del perímetro mediterráneo (Turquía, los Balcanes, etcétera).

Sin embargo, en la actualidad el oro tiene muchas y más interesantes aplicaciones. Al hacer una llamada telefónica mediante un celular, al tomar una foto con una cámara digital o, simplemente, al utilizar el teclado de una computadora, ahí hay oro trabajando. Sus propiedades excepcionales —resistencia a la corrosión, conductividades térmica y eléctrica muy elevadas, lo hacen un material de elección para la electrónica donde se puede aplicar en películas superdelgadas sobre los contactos eléctricos, los interruptores, los conectores, etcétera.

De hecho, una tonelada de circuitos electrónicos contendría entre 200 y 400 gramos de oro.

Debido a que el oro es un buen reflectante, se usa para proteger los satélites, las naves espaciales y los cascos de los astronautas contra los rayos del sol. Obviamente se usa en odontología pero también para fabricar sondas neuroquirúrgicas. El oro ha resultado ser tan



Figura 5. Daga y funda. Regalo proveniente del norte de Siria o del Mar Egeo encontrado en la tumba de Tutankhamun.



Figura 6. Delicado venado de oro en la empuñadura de un bastón. Región de Sinú. Incas.

⁴ ¡No es cierto que todas las sustancias iónicas sean solubles en agua! La mayoría de los hidróxidos, de los carbonatos, de los fosfatos y de los sulfuros no lo son.

⁵ Estirado, un gramo puede transformarse en un hilo de tres kilómetros. Aplastado, puede formar una lámina de un metro cuadrado con un espesor de tan sólo 1/15 de micra.



Figura 7. El tesoro más antiguo conocido en Europa pertenece a una rica colección de regalos enterrados en Varna, a orillas del Mar Negro probablemente 4,000 años a.C.

buen catalizador como los otros metales nobles (Ru, Rh, Pd, Ag, Os, Ir y Pt).

Uno de los isótopos del oro,⁶ el oro-198, ¹⁹⁸Au, se usa en el tratamiento del cáncer y el tiosulfato de oro y sodio se usa para tratar la artritis.

A escala mundial, 80% de la producción minera es destinada a la joyería, 10% a piezas y lingotes mientras que el otro 10% a usos industriales. India, Italia y China son los tres más grandes consumidores de joyas de oro.

Nobleza, divinidad y poder

La química nos ha enseñado que, bajo las condiciones adecuadas, prácticamente todas las sustancias se pueden transformar en otras. Casi no hay sustancias que no puedan ser atacadas químicamente por alguna otra. Lo inalterable es poco común. E, inevitablemente se asocia con lo immaculado, con lo impoluto, con lo eterno.

El oro es inalterable como los dioses mismos. Es esta característica, más que su escasez, la responsable de la atracción que desde siempre ha ejercido sobre el hombre. Brillante y amarillo como el sol —su nombre deriva del latín *aurum* que significa *aurora*—, el sempiterno oro simboliza más que ningún otro metal la divinidad y el poder.

⁶ 198 se refiere al número de protones y neutrones en el núcleo: 79 protones y 119 neutrones. A la suma de protones y neutrones se le conoce como número de masa.

La química, la ciencia dedicada a entender cómo y por qué unas sustancias reaccionan con otras, nos ha permitido comprender el porqué de su inalterabilidad. Vale la pena recordar algunas ideas relacionadas.

Todas las sustancias consisten de pequeñísimas partículas que a su vez constan esencialmente de dos partes: los núcleos (positivos) y los electrones (negativos). La interacción eléctrica entre núcleos y electrones da lugar a la estructura interna de estas partículas. El balance entre el número de cargas positivas y negativas da la carga de la partícula. Si son iguales la partícula es neutra. Si no, la partícula tendrá una carga eléctrica distinta de cero.

Así, puede haber tres tipos de partículas de importancia química:

- Los **átomos**, mononucleares y neutros.
- Las **moléculas**, polinucleares y neutras.
- Y los **iones**, mono o polinucleares y con carga eléctrica distinta de cero.

Dada su naturaleza eléctrica, las partículas mismas pueden seguir interactuando con sus vecinas dando lugar a los estados de agregación de las sustancias. A mayor atracción, mayor agregación. En el estado gaseoso, la interacción entre las partículas es prácticamente nula. En cambio, para líquidos y sólidos es realmente significativa.

Además, partículas de una sustancia pueden interactuar con partículas de otras sustancias. Si la interacción es relativamente débil, lo que ocurre es que las partículas se atraen tanto entre sí que se mezclan, a tal grado, que nuestro ojo lo que percibe es un material aparentemente homogéneo sin poder distinguir que, en realidad, se trata de dos sustancias mezcladas. Las disoluciones son un ejemplo de este tipo de interacciones.

Sin embargo, si



Figura 8. Enorme escarabajo de lapislázuli incrustado en un brazalete de oro encontrado en la tumba de Tutankhamen (visto con la ayuda de un espejo).

la interacción es todavía mayor, se puede dar el caso de que se formen otras partículas, con más o con menos núcleos, con más o con menos electrones. O sea, partículas de otro tipo y, por lo tanto, pertenecientes a otras sustancias. Para que esto ocurra se requiere, entre otras cosas, que los electrones de la última capa —llamados *electrones de valencia*— no estén tan unidos a sus núcleos.

No es el caso del oro —ni el de los demás metales nobles ni el de los gases nobles tampoco—, cuyos electrones de valencia están tan fuertemente unidos al núcleo que difícilmente pueden ser intercambiados o compartidos con otros núcleos para dar lugar a la formación de otras partículas. De hecho, esta fuerte interacción núcleo-electrónica en el oro, es la causa de sus características más notables: su gran densidad, su elevada energía de ionización⁷ y —por si fuera poco— también de su hermoso color amarillo.

Un solo átomo de oro no es una partícula estable. Pero cientos de miles de trillones interactuando, sí que lo son. Los escasos electrones de valencia se desplazan alrededor de todos los núcleos. O, por decirlo con una figura literaria, es como si los núcleos de oro se encontraran inmersos en un mar de electrones. Así, en las condiciones de presión y temperatura que imperan en la superficie terrestre, los átomos de oro no son estables y, en vez de ello, se forman unas redes metálicas que pueden crecer infinitamente y que nosotros, en nuestra ciega e infinita ambición, llamamos lingotes.

El color del oro refleja su pureza. Si se le agrega una pizca de cobre, se vuelve rojo. Una de plata... y se ve verde. Agregarle níquel o paladio le da un tinte grisáceo. Y agregarle aluminio le da un brillo violeta.

Siendo inalterable, inoxidable y raro, el oro pronto se empezó a utilizar como moneda. En el mundo antiguo, el oro se valoraba frecuentemente con respecto a la plata. Y ésta, a su vez, se evaluaba en peso de cebada, de cobre, de aceite o incluso en número de bueyes.

Las primeras monedas acuñadas en siglo VII a.C, en Lidia (Turquía) estaban hechas de *electrum*, una aleación de oro y plata. Dado que era difícil mantener constante la proporción de estos dos me-

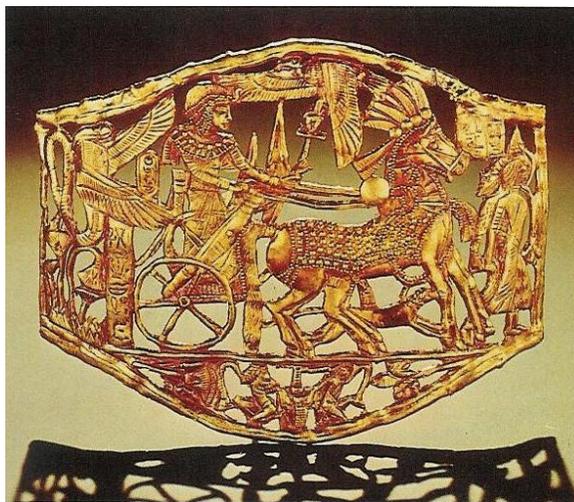


Figura 10. Hebillas de oro en la tumba de Tutankhamun donde se refiere un ficticio regreso triunfal de Tutankhamunya que el rey niño probablemente nunca fue a la guerra.

tales, el uso de estas monedas pronto se hizo caduco. Creso (561-546 a. C.), rey de Lidia, resolvió el problema emitiendo dos monedas, una de oro y otra de plata. Constantino El Grande fijó el precio de la pieza de oro en 4.54 gramos, veinticuatro veces el de la pieza de plata (o el de cuatro granos de algarroba). A esta unidad se le llama **quilate**.⁸

Así, la pureza del oro se expresa en quilates. El oro puro es de 24 quilates. Un oro de 22 quilates contiene 22 partes de oro y dos partes de otros metales o sea, 91.6 % de oro. Debajo de ocho quilates (33.3% de oro) ya no se considera que sea oro.

China, Hong Kong y Taiwán comercializan un oro de 24 quilates. El subcontinente indio, un oro de 22 quilates. Los países del mediterráneo, un oro de 18 quilates. El oro que se vende en el norte de Europa y en los Estados Unidos es el más pobre: ientre 18 y 8 quilates!

¿Qué otra cosa?

No mucho. No soy ambicioso.

Bueno, ando consiguiendo provisiones y equipo. ¡Ah!, también estoy releyendo a Julio Verne.



Figura 9. Guerrero, Incas.

⁷ La energía de ionización es la energía necesaria para “arrancar” un electrón a un átomo, una molécula o un ion. Es una medida de qué tan atraído está el electrón por el (o los) núcleo(s) de la partícula.

⁸ Algarroba en árabe es *qirat*, de donde pasó al griego como *κερατιον* y llegó al español como *quilate*.