

ORO

Arte, Ciencia y Tecnología

Antonio Laguna Castrillo
Catedrático de Química Inorgánica de la Universidad de Zaragoza.

Introducción

El oro es un metal noble de color amarillo rojizo, blando, dúctil y maleable y buen conductor del calor y la electricidad. Si exceptuamos el color, una definición similar se podría dar de otros muchos metales del Sistema de Periodos; pero a pesar de ello, el oro es, ha sido y, por las apariencias, seguirá siendo un elemento codiciado por hombres y mujeres en el que han visto representadas sus ansias de riqueza y poder. Muchos de los elementos son tóxicos, pero el oro es uno de los pocos que envenena más la mente que el cuerpo.

Este sueño o deseo de posesión de oro ha sido común para todas las razas, culturas y religiones y ha estado presente en numerosas leyendas. Ha servido para realizar los más bellos trabajos de arte. En este sentido, muchas de las imágenes que han representado a los dioses de las diferentes culturas o, sencillamente, pequeñas o grandes piezas que han servido para el adorno o distinción de templos, palacios o de las personas de clase social alta, han sido realizadas con este preciado metal que ha estado presente en la historia de la humanidad desde hace más de 7000 años, como se confirma, por ejemplo, con los excelentes trabajos de orfebrería encontrados en los sarcófagos de las culturas minoica o faraónica.

El importante papel que el oro ha representado en la historia queda reflejado en las numerosas leyendas que han llegado hasta nosotros desde los orígenes de la civilización. Una de las primeras es la del rey Midas, cuyo nombre es todavía hoy sinónimo de enriquecimiento rápido, y que era utilizada por los griegos para explicar la importante cantidad de este metal que se encontraba en Lydia, en Asia Menor (actual Turquía). Tras ayudar a Silenos, el joven dios del vino, Dionisios, le concede el deseo de transformar en oro todo aquello que tocara. Al comprobar que incluso la comida se convertía en oro y que, por lo tanto, ese poder le conduciría a la muerte, le solicita al dios volver a la situación anterior. Para ello debe purificarse en las aguas del río Pactolo y desde ese momento las aguas de este río fueron ricas en oro. De hecho, los depósitos de aluvión de pepitas de oro fueron las primeras fuentes de aprovisionamiento de este metal en la antigüedad, aunque prácticamente han desaparecido en la actualidad.

Por otro lado, son también muy numerosas las expediciones que, en busca de este metal, se han desarrollado a lo largo de la historia, tanto real como la mítica. Desde la de los argonautas que pretendían el vellocino de oro que custodiaba un dra-



gón por orden de Eetes, el mítico hijo del sol, hasta la protagonizada, hace unos quinientos años, por Lope de Aguirre, en busca de El Dorado, o por Francisco Pizarro, a través del territorio Inca y que culminó con la muerte de Atahualpa, el último emperador inca.

Aunque resulta evidente la importancia que ha tenido y sigue teniendo este metal, es más difícil resumir las razones por las cuales el oro ocupa esa posición única y se le viene considerando como "el rey de los elementos". No se trata sólo de que el oro sea un metal poco abundante en la corteza terrestre, ya que otros metales, como platino, rodio, iridio, osmio o renio, por citar unos pocos, son más raros y también más caros. Su color amarillo y el brillo que posee cuando se ha pulido, lo hacen muy atractivo, pero tampoco es posible encontrar una justificación en este hecho, ya que otros metales, como cobre, u otras aleaciones, como bronce o latón, tienen coloraciones poco habituales. Mayor importancia tiene, sin embargo, su carácter noble que ha permitido fabricar monedas o joyas que no se alteran, incluso hasta el punto de ser virtualmente indestructibles, tras largos periodos de exposición en ambientes agresivos, o sometidas al ataque enzimático en sistemas biológicos.

Extracción y refinado

Como consecuencia de su carácter noble, el oro se encuentra en estado nativo en la naturaleza, aunque puede estar aleado con pequeñas cantidades de otros metales, como plata (en cuyo caso la aleación se conoce con el nombre de *electro*) o metales del grupo del platino (rutenio, osmio, rodio, iridio, paladio y platino).

Los granos de oro contenidos en la roca han podido quedar liberados por acción de la erosión y, posteriormente, ser arrastrados como resultado de la acción de ríos o glaciares. De esta manera, los granos o pepitas de oro son depositados en los remansos o en las zonas en las que la velocidad de la corriente de los ríos ha disminuido lo suficiente como para impedir su arrastre. Estos depósitos se conocen con el nombre de *placeres*. Si se tiene en cuenta el color llamativo del oro y que estos yacimientos se encuentran, generalmente, en valles o zonas accesibles, es fácil comprender que fueran utilizados desde épocas remotas. La obtención del oro, a partir de las arenas de estos ríos, es relativamente sencilla y, para ello, se aprovecha la alta densidad de este metal ($19,3 \text{ g cm}^{-3}$), comparada con la de

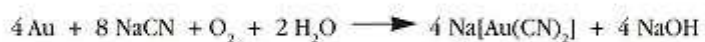
la arena ($\sim 2,5 \text{ g cm}^{-3}$). Tradicionalmente se ha realizado de forma individual, utilizando bateas o cualquier otro tipo de instrumento que permitiera la visualización de las pepitas de oro. La mezcla de agua y gravilla extraída del río con una batea, se somete a un movimiento circular. Las pepitas de oro que puedan estar presentes van al fondo, mientras que los materiales menos densos desbordan. Posteriormente, los granos de oro se limpian de otros elementos extraños que les puedan acompañar. Este rudimentario procedimiento todavía juega un papel económico no despreciable en algunas regiones de Sudáfrica y América del Sur. A mayor escala, se utilizan concentradores de gravedad y este método es uno de los mejores modos de recuperar oro grosero, cuando el tamaño de los granos de oro es superior a 0,1 mm.



Oro nativo.

A medida que estos yacimientos se iban empobreciendo o se descubrían otros nuevos, con menor contenido en oro, se fueron desarrollando otros métodos de extracción. Estos son, principalmente, la amalgamación y la lixiviación con disoluciones cianuradas. La extracción del oro con mercurio ya fue descrita por Plinio y, de hecho, la técnica de la amalgamación fue el método más importante hasta la introducción del proceso de extracción con cianuro en 1887. El mineral se tritura, en presencia de agua, hasta un tamaño que garantice la total liberación de las partículas de oro. A continuación, la suspensión acuosa se hace pasar sobre laminas de cobre recubiertas de mercurio. En estas condiciones el oro es retenido por el mercurio, formando una amalgama. Al calentar en una retorta, el mercurio destila y puede ser regenerado, dejando el oro como residuo. Este proceso debe ser controlado con mucho cuidado, para evitar posibles riesgos de los trabajadores, por envenenamiento con mercurio, y la polución medioambiental.

La lixiviación con disoluciones cianuradas de arenas o rocas de baja ley (25 ppm de oro), finamente trituradas, es uno de los métodos más utilizados en la actualidad. Se basa en el hecho de que el oro (y la plata), en presencia de un exceso de cianuro, puede ser oxidado por el oxígeno del aire para dar el anión $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ que es soluble en agua, de acuerdo con la siguiente ecuación:



Posteriormente se filtra esta suspensión y el oro se precipita por adición de cinc metálico a la disolución cianurada:



y el exceso de cinc se elimina del precipitado por tratamiento con ácido. El residuo de oro se funde en barras que serán posteriormente refinadas. En general, la plata que pueda estar presente en el mineral de partida, acompaña al oro en todo el proceso, por lo que tiene que ser separada en una etapa de purificación. Sin embargo, dada la importante diferencia de precios entre estos dos metales preciosos, la economía del proceso se centra en la purificación del oro.

Una de las dificultades más importantes que plantea este método es el trabajar con disoluciones cianuradas que deben ser destruidas para eliminar los problemas medioambientales. Esto se consigue por oxidación del cianuro a amoníaco y carbonato, con agua oxigenada o, más recientemente y siguiendo una patente sudafricana, con oxígeno del aire y la luz del sol, en presencia de un catalizador.

Cada vez con mayor frecuencia, se están utilizando yacimientos con leyes más bajas. Cuando las partículas de oro son muy pequeñas y se encuentran muy diseminadas en el interior de una matriz sulfurada, sólo las partículas que se encuentran en la superficie podrán ser atacadas por los iones cianuro y pasar a la disolución. Por otro lado, los metales pesados que pueden estar presentes en estos materiales, por ejemplo, como piritita o arsenopiritita, reaccionarán también con el cianuro, provocando un consumo excesivo de reactivo. Además, algunos minerales refractarios pueden contener también productos orgánicos que aumentan el consumo de cianuro y pueden provocar la retención de una parte de oro al formar complejos con él, reduciendo la eficacia de la lixiviación. En estos casos se están introduciendo nuevos procesos alternativos, entre los que destaca el tratamiento previo con microorganismos, *Tiobacillos ferro-oxidantes*, que oxidan el sulfuro de la matriz a sulfato que ahora es soluble en agua y permiten, por lo tanto, disgregar el material y liberar las partículas de oro. Posteriormente, el residuo se lixivia con una disolución cianurada.

En la purificación y refinado del oro, el método más utilizado consiste en la electrodeposición. Para ello, en una celda electrolítica, el oro impuro se hace funcionar como ánodos en disoluciones de cloruro de oro/ácido cloroáurico y el oro puro (99,99 %) se deposita en el cátodo. Periódicamente, se retiran los cátodos y el oro se funde para que alcance la forma deseada.

Aplicaciones del elemento

Probablemente el oro fue el primer metal descubierto y utilizado por el hombre hace ya más de siete mil años y, desde entonces, sus potenciales aplicaciones fueron aumentando y creciendo en importancia.

a) Joyería y numismática. Al ser maleable y fácil de trabajar, pronto se fabricaron con él adornos y joyas y dada su escasez e inalterabilidad, pronto se convirtió también en objeto de intercambio y se acuñaron las primeras monedas. Egipto fue, durante muchos años, un productor importante de oro, gracias a las importantes fuentes de oro nativo procedentes de los depósitos de aluvión que se encontraban en el valle del Nilo. Así ha quedado reflejado, por ejemplo, en algunos de los jeroglíficos de los monumentos de la Cuarta Dinastía (antes de 3800 a.C.). El documento más antiguo que ha llegado hasta nosotros, en el que se recogen las diferentes técnicas de trabajo con oro, es un papiro encontrado en una tumba de Tebas, siglo IV a.C., que actualmente se conserva en el Museo de An-

tigüedades de Leiden (Papiro X). Se trata de un manual metalúrgico en el que se incluyen recetas, algunas de ellas probablemente procedentes de trabajos más antiguos, que describen, no sólo las técnicas de refinado, sino también las diferentes formas de alearlo, soldarlo o de confirmar su pureza.

Los beneficios económicos que supone la utilización de metales preciosos como medio de intercambio en forma de moneda, se reconocen por primera vez en Lydia, hacia el siglo VII a.C., y el rey Croeso de Lydia (mediados del siglo VI a.C.) acuña las primeras monedas con cantidades controladas de oro y plata (proporción 10:1). Sin embargo, no es hasta el siglo V a.C. cuando se desarrollan las técnicas adecuadas para producir monedas de oro puro, mediante la eliminación de la plata que suele acompañar al oro en la Naturaleza.

Los griegos tuvieron también una participación significativa en la producción y manipulación de oro, especialmente después de que Filipo II, padre de Alejandro Magno, consiguiera el control de las minas de Macedonia (hacia el 358 a.C.). Sin embargo, no parece que sus métodos supusieran un avance respecto de los desarrollados por los egipcios. Algo parecido se puede decir de los romanos, cuya producción se incrementa notablemente después de la invasión de Asturias (30 a.C.). Los emperadores romanos acuñaron monedas de oro de gran pureza, especialmente durante la época que abarca desde Augusto hasta el siglo III de nuestra era.

Los conocimientos de estas civilizaciones antiguas fueron introducidos en la Europa medieval por los árabes, a través de lo que se conoce como Alquimia. Durante la Edad Media la Alquimia se recubre de ideas esotéricas que se mezclan con conocimientos de astrología, creencias religiosas, ocultismo y magia. De forma deliberada se introducen fórmulas mágicas y de encantamientos en la descripción de los resultados que oscurecen y dificultan el seguimiento de los logros alcanzados. Uno de los objetivos que se persigue durante esta época es la transmutación de los metales base en metales nobles como el oro o la plata. Sin embargo, los estudios detallados de los documentos de esta época revelan que los intentos de transmutación derivaban en la práctica en procesos de aleación o tratamiento superficial de metales con el objeto de conseguir coloraciones parecidas a las del oro o la plata. En este sentido, es curioso que algunas de las recetas utilizadas por las civilizaciones precolombinas para conseguir el dorado de metales, en particular a partir de aleaciones de cobre, son muy similares a las operaciones de 'transmutación' realizadas por los alquimistas.

La mayor parte de los avances conseguidos hasta 1556 sobre la metalurgia del oro aparecen recogidos en el ya clásico *'De re metallica'* de G. Agricola. Se trata del primer libro que, con una aproximación científica y apoyándose en numerosos esquemas, analiza la extracción, refinado y formas de trabajar los diferentes metales. Hoy día continúa siendo una guía de gran valor.

En el momento actual, el oro sigue desempeñando un papel dominante en el mercado de la joyería. Así, en 1990, la cantidad de oro destinada en el mundo a la fabricación de joyas u otros objetos de adorno fue de unas 2000 toneladas, lo que supone aproximadamente el 75 % de la demanda total. Aunque el oro puro (24 quilates) es muy fácil de trabajar, su uso para la fabricación de joyas es más bien limitado porque se trata de un material excesivamente blando que se deforma con facilidad. Por ello y para mejorar sus propiedades mecánicas, el oro se alea con otros metales. Durante siglos, las aleaciones más importantes se han basado en el sistema ternario Au-Ag-Cu. La

variación en el contenido de estos elementos produce modificaciones de las propiedades mecánicas y ofrece una amplia variedad de colores que oscilan entre los tres colores característicos de estos metales: amarillo del oro, blanco de la plata o rojo del cobre. Adicionalmente se suele añadir cinc que actúa como desoxidante y disminuye la dureza y el punto de fusión de la aleación. La aleación conocida como oro blanco contiene níquel o paladio como decolorantes, así como pequeñas cantidades de cobre, plata o cinc.

Las aleaciones utilizadas generalmente en joyería de calidad tienen un contenido en oro de 750/1000 (18 quilates) ya que en ellas se optimizan el color, dureza y resistencia a la corrosión. No obstante, se utilizan también otras aleaciones más pobres de 585/1000 (14 quilates), con un buen compromiso entre las propiedades requeridas y precio, o con contenidos de 375/1000 (9 quilates) o incluso de 333/1000 (8 quilates). Estas dos últimas se pueden corroer en condiciones desfavorables. Recientemente se están desarrollando nuevas aleaciones. Así, por ejemplo, la adición de titanio aumenta notablemente la dureza del oro y una aleación de 990/1000 (23,76 quilates) posee unas propiedades mecánicas semejantes al tradicional oro de 18 quilates. Oro azul o violeta se puede conseguir formando compuestos intermetálicos de oro y aluminio; así, el compuesto de composición AuAl₃ (78,5 % de oro y 21,5 % de aluminio, en peso) tiene un color violeta intenso.



Oro nativo cristalizado. (Foto cortesía de Antonio Ceruelo).

Naturalmente, la adición de otros elementos al oro sirve para mejorar algunas de sus propiedades, pero también se ha utilizado para cometer fraudes y, al parecer, esta práctica se ha venido realizando desde los primeros tiempos. Cuentan las crónicas que Hieron II, rey de Siracusa hacia el año 250 a.C., encargó una corona de oro a un orfebre, a partir de un lingote de oro previamente pesado. Una vez finalizado el trabajo, la corona que le entregó el orfebre pesaba exactamente lo mismo, pero ante la sospecha de que una parte del oro hubiera sido sustituida por la misma cantidad de cobre, encargó a Arquímedes que resolviera el problema. El oro es el metal más denso (19,3 g cm⁻³), por lo que un determinado peso de oro ocupará menos volumen que el mismo peso de cualquier otra sustancia (por ejemplo, oro impuro). El cobre tiene una densidad de 8,92 g cm⁻³, casi la mitad que la del oro, por lo que 100 g de oro ocuparán un volumen 5,18 cm³, mientras que 100 g de una aleación de 90 g de oro y 10 g de cobre tendrá

un volumen aproximado de $5,78 \text{ cm}^3$, es decir que existirá una diferencia de aproximadamente $0,6 \text{ cm}^3$. Arquímedes sólo debía medir el volumen, para lo que comparó la cantidad de agua que se desplazaba al sumergir la corona y el mismo peso de oro puro en agua, con lo que pudo confirmar que la corona no había sido realizada con oro puro. Hoy día existen métodos de análisis por comparación (Piedra de Toques) o muy precisos (espectrometría de absorción atómica o espectrometría de masas) que permiten conocer la pureza del oro a partir de cantidades muy pequeñas de muestra.

b) *La electrodeposición o dorado*, aunque es un proceso relativamente reciente que se empezó a utilizar hace aproximadamente unos 200 años, tiene importantes aplicaciones en joyería o en otras industrias relacionadas. Consiste en recubrir un determinado objeto con una pequeña película de oro. Con ello se consigue evitar la corrosión de artículos realizados con materiales como oro de pocos quilates, plata, bronce u otras aleaciones metálicas, y se le da un color más atractivo. El grosor del dorado puede variar ampliamente desde $0,1 \mu\text{m}$, cuando se buscan sólo fines decorativos, sin que sea demasiado importante una alta resistencia a la corrosión o al roce con los tejidos, hasta $20 \mu\text{m}$, para aquellos objetos de los que se espera una vida útil mayor.

El principio de la electrodeposición es sencillo. La pieza que se desea dorar actúa como cátodo (en el caso de que no sea metálica, se recubre de una película conductora), conectada al polo negativo de una fuente de baja energía y se sumerge en una disolución electrolítica que contiene iones del metal que se va a depositar. Los electrolitos son generalmente disoluciones acuosas de sales de oro, frecuentemente $\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2]$, aunque también se pueden usar sulfatos de oro, $[\text{Au}(\text{SO}_2)_2]^{2-}$. Estas disoluciones suelen contener también otros metales, de manera que al depositarse con el oro formen aleaciones más duras y resistentes. Estos metales suelen ser los mismos que los señalados en el apartado anterior. Así, por ejemplo, para obtener depósitos coloreados se suele añadir cobre, plata y cinc, aunque es frecuente también la adición de cadmio y níquel. El cadmio favorece la formación de películas finas y de grano uniforme y la adición de níquel es eficaz para aumentar la du-



Pequeños lingotes de oro, Europa Central

reza y resistencia al roce con los tejidos. El ánodo puede ser de oro, pero generalmente es de titanio platinado. Al aplicar una diferencia de potencial apropiada entre los dos electrodos, los iones metálicos adyacentes a la superficie catódica se reducen electroquímicamente al metal que se electrodeposita en el cátodo. Esta técnica permite un exacto control de la calidad y del grosor del depósito, por lo que puede ser utilizada, no solo en joyería, sino también en la industria electrónica, con el diseño de depósitos de oro selectivos en determinadas áreas del componente.

Para el dorado de objetos no metálicos, como ceras o plásticos o incluso objetos naturales (hojas, flores...), es necesario hacer previamente conductora su superficie. Para ello, uno de los métodos más utilizados en la actualidad consiste en aplicar una fina capa de plata ($0,1 \mu\text{m}$), de una forma parecida a la que se usa en la fabricación de espejos. Con una pistola se espolvorea la superficie del objeto con dos disoluciones, una amoniacal de nitrato de plata y otra reductora, de manera que se mezclen íntimamente. Así se forma una capa de plata coherente y conductora que permite un posterior dorado de ese objeto.

c) *Electrónica*. La moderna industria electrónica consume importantes cantidades de oro, aproximadamente el 15 % de la producción mundial, debido a una única combinación de propiedades que incluyen una excelente conductividad eléctrica, una excepcional resistencia al uso y a la corrosión y la facilidad de recubrir una amplia variedad de materiales. Las dos aplicaciones más importantes son la fabricación de conectores y circuitos impresos, en los que el oro se deposita electrolíticamente. Con la llegada de los sistemas de comunicaciones por microondas, el oro ha adquirido una mayor importancia y es el metal preferido para la producción de los circuitos especializados que se necesitan en las aplicaciones de alta frecuencia, especialmente cuando se requiere una alta precisión. Por otro lado, y aprovechando que el oro puro es dúctil y blando, se utiliza también para la unión de componentes de semiconductores por termocompresión.

El dorado de materiales es particularmente importante en las aplicaciones del espacio. Las propiedades únicas del oro, en particular, su alta capacidad para reflejar la radiación infrarroja y su resistencia a empañarse en la atmósfera terrestre, hacen que sea insustituible en el control de radiaciones térmicas. Además, el oro es muy resistente a la sublimación en las condiciones de alto vacío del espacio. Este hecho evita que se puedan producir cortocircuitos en los equipos electrónicos, lo que ocurre cuando se utilizan otros metales, como resultado de la evaporación y recondensación del metal.

d) *Oro líquido*. Se conoce como oro líquido a aquellas preparaciones de compuestos de oro que se utilizan para decorar cerámicas o vidrios. Se trata generalmente de disoluciones en disolventes orgánicos de complejos de oro con ligandos nitrógeno u oxígeno dadores que no son muy estables térmicamente. Estas disoluciones se aplican sobre la superficie lisa que se desea decorar y al calentar, en contacto con el aire para quemar todos los componentes orgánicos, se produce un depósito especular, similar a una lámina de oro. Esta película suele ser de 22 quilates y de un espesor de $0,12 \mu\text{m}$. Estas disoluciones suelen contener, además, pequeñas pero esenciales cantidades de compuestos de rodio y otros metales como bismuto, cromo, vanadio, silicio o estaño. La presencia de rodio asegura que la película de oro que se forma, sea brillante y ho-

mogénea. Al parecer, el óxido Rh_2O_3 , se forma en los límites de los granos de las partículas de oro, lo que impide la difusión del oro de una partícula a otra y, por lo tanto su aglomeración. De esta manera se evita la formación de islas de oro en el sustrato. La presencia de otros metales asegura una fuerte unión de la película a la cerámica o vidrio y actualmente se consiguen adherencias que resisten perfectamente el tratamiento con los detergentes habituales y con los lavavajillas.

e) Odontología. El oro tiene importantes aplicaciones en odontología como consecuencia de su buena tolerancia por los tejidos, excelente inercia química que le permite permanecer inalterado a la acción corrosiva de los fluidos orales, así como, por la facilidad con la que se le puede manipular. De hecho, la utilización de alambres o pequeñas cintas de oro para sujetar los dientes que se habían desprendido es una práctica muy antigua. Se ha encontrado ya en algunas tumbas egipcias del tercer milenio a.C., aunque no está muy claro si en estos casos los arreglos se hicieron a las personas vivas o si, por el contrario, se trata de alguna etapa previa al embalsamamiento de los cuerpos. Los etruscos (1000 - 400 a.C.) utilizaban pequeñas cintas de oro que se sujetaban a los dientes sanos y que, a su vez, servían para sujetar los incisivos que se habían caído. Estos procedimientos de restauración dental se siguen utilizando también en la época de los griegos y romanos, pero caen en el olvido durante la Edad Media, hasta el siglo XVI en el que se empiezan a utilizar nuevas técnicas que con algunas variaciones han continuado hasta nuestros días.

Actualmente se utilizan aleaciones de oro, cobre y plata que suelen contener, además, pequeñas cantidades de metales del grupo del platino, principalmente paladio y platino, que contribuyen a aumentar su resistencia a la corrosión y al empañamiento, así como a aumentar su dureza. Se utilizan para el llenado de cavidades producidas por la caries, arreglo de coronas o puentes, así como las uniones o grapas que permiten sujetar las diferentes prótesis. Uno de los avances más importantes, desde el punto de vista técnico y estético, ha sido el desarrollo de porcelanas que pueden recubrir el sustrato metálico y que en apariencia no se distinguen de los dientes naturales.

f) Otras aplicaciones. Cada vez son más numerosas las aplicaciones a las que se destina el oro metálico. Así, por citar sólo un ejemplo más, se puede utilizar para evitar el empañado o helado de los parabrisas de trenes de alta velocidad. Para ello se deposita una capa de oro muy fina (de 10 nm) sobre la superficie interna del vidrio exterior del parabrisas. Se trata de una capa transparente y eléctricamente conductora, lo que permite que la corriente eléctrica circule entre las dos láminas de vidrio para mantenerlas a la temperatura apropiada, sin generar efectos ópticos adversos (como ocurre en los sistemas de calefacción por hilos). Otra ventaja es que la lámina de oro refleja la radiación infrarroja y absorbe parte del visible, con lo que se reduce la posibilidad de deslumbramiento. Normalmente el depósito de oro se aplica sobre una capa de óxido de bismuto (sandwich $Bi_2O_3/Au/Bi_2O_3$), lo que aumenta su conductividad y transparencia.

Química

La química de oro ha sido durante mucho tiempo algo así como la Bella Durmiente entre el resto de los metales preciosos. Hasta hace relativamente poco tiempo, parece como si lo



Colgante zoomorfo bíceftalo, 700-1550 d.C. Oro.

único importante fuese el metal y casi toda la química conocida giraba entorno a la obtención y purificación de este elemento. Sin embargo, durante las últimas tres décadas esta química ha experimentado un desarrollo espectacular que ha permitido la apertura de numerosas ramas científicas y, de nuevo, ha puesto de manifiesto que el oro tiene un comportamiento único entre los elementos. En él concurren una serie de hechos que son poco habituales:

- En primer lugar, el valor de su potencial electroquímico que es el más bajo de cualquier otro metal; lo que significa que el oro en forma catiónica, aceptará electrones de casi cualquier fuente (agentes reductores) para pasar al estado metálico.
- El oro es, además, el metal más electronegativo, lo que, en cierto modo, confirma también su comportamiento de metal noble.
- No es frecuente que encontremos en los libros de texto, valores de electroafinidad para los metales, ya que, en condiciones normales, éstos no se encuentran en forma aniónica. Sin embargo, el anión Au^- se puede formar con relativa facilidad y este hecho ya es conocido desde 1930. La reacción entre cantidades equimoleculares de oro y cesio, produce fácilmente el derivado Cs^+Au^- que no se comporta como una aleación, sino como un compuesto iónico, en el que el centro de oro es el anión, y presenta la misma estructura que la del ioduro de cesio.
- Otro fenómeno poco corriente se encuentra en el vapor de oro, ya que éste está formado por moléculas diatómicas (Au_2), cuya energía de disociación es mayor que la de otras muchas moléculas diatómicas, lo que indica la existencia de un fuerte enlace entre los dos átomos de oro.
- Los estudios de difracción de rayos X han puesto de manifiesto que en muchos compuestos los centros de oro se encuentran a distancias muy próximas. Es como si existiera una fuerza interatómica atractiva que, aunque débil, parece ser responsable de las configuraciones moleculares y estructuras cristalinas únicas que se observan en los mismos. Este efecto es comúnmente conocido como *aurofilia*. Así, en los complejos de oro(I) de

estequiometría [AuXL] se observa que estas moléculas tienden a asociarse a través de distancias intermetálicas cortas, de $3,00 \pm 0,25 \text{ \AA}$, formando parejas (Fig. 1, a y b), anillos (Fig. 1, c, e y f), cadenas (Fig. 1, d y g) o, incluso, capas. Estas interacciones pueden ser *intra*- o *inter*moleculares.

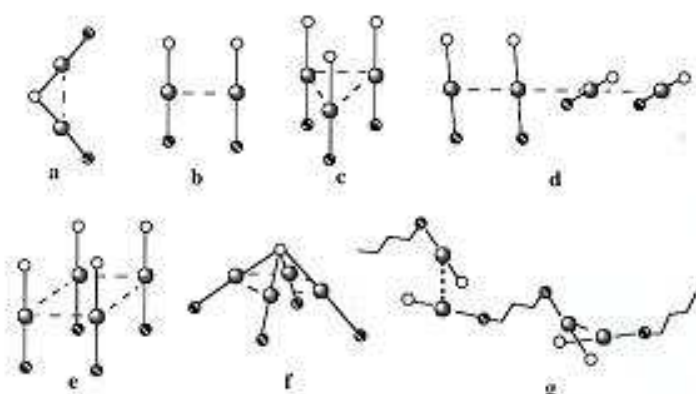
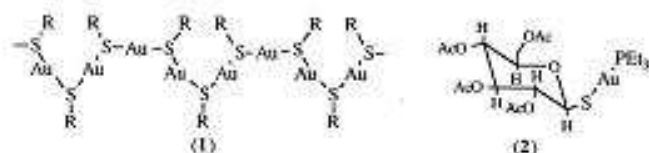


Fig. 1. Ejemplos de compuestos preparados en el Departamento de Química Inorgánica de nuestra Universidad que muestran contactos entre centros de oro(I). ● = Au, ○ = X, ⊙ = L.

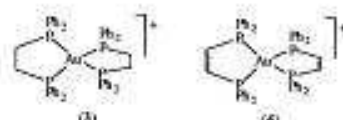
Algunas aportaciones teóricas recientes están contribuyendo a explicar el comportamiento único de este elemento. En concreto, se trata de las teorías que tienen en cuenta los efectos relativistas y de correlación electrónica que son especialmente importantes en aquellos átomos que, como el oro, tienen una alta carga nuclear y, por lo tanto, también un gran número de electrones. La conclusión más importante de estas consideraciones es que se produce una estabilización de los orbitales 6s, mientras que los orbitales 5d se hacen menos estables, por lo que será más fácil el poder disponer ahora de los electrones que se alojan en estos orbitales. Esta situación explica, no sólo las pautas de comportamiento señaladas anteriormente, sino que también justifica la importancia del estado de oxidación III, prácticamente ausente en la química de cobre o plata, e incluso la posibilidad de alcanzar el estado de oxidación V, desconocido en la química de los elementos de su mismo grupo.

Alguno de los complejos de oro, en particular los de oro(I), tienen aplicaciones en el campo de la medicina. Desgraciadamente, aunque este interés es casi tan antiguo como su descubrimiento, muchas propuestas sobre sus aplicaciones terapéuticas no han sido eficaces y no es hasta hace aproximadamente un siglo cuando se empiezan a utilizar algunos derivados eficaces en crisoterapia (tratamiento de enfermedades con compuestos de oro). Así, por ejemplo, algunos tiolato complejos de oro(I) son ampliamente utilizados en el tratamiento de la artritis reumática. Entre los más utilizados se encuentran los compuestos de estequiometría [AuSR] (1), RS = tiomalato de sodio (Miocrisina) o tioglucosa (Solganol), aunque recientemente se ha encontrado que es más efectivo el derivado S-(2,3,4,5-tetraacetil-1-β-D-tioglucofuranosa)(trietilfosfina)oro(I) (2) (Auranofin o Ridaura), dado que puede ser administrado oralmente.



La artritis reumática es una enfermedad difícil de estudiar y, por ahora, no se conocen las causas precisas que la provocan, por lo que tampoco se tiene mucha información sobre el mecanismo de acción y bioquímica de estos compuestos, aunque tienen efectos beneficiosos en el tratamiento de la misma.

Durante los últimos años se han encontrado también algunos complejos que son eficaces en el tratamiento de determinados tipos de tumores, aunque su aplicación práctica es limitada, debido a que poseen severos problemas de toxicidad. Así, por ejemplo, sales de los cationes tetraédricos $[Au\{PPh_2(CH_2)_2PPh_2\}_2]^+$ (3) ó $[Au\{PPh_2CH=CHPPh_2\}_2]^+$ (4) tienen propiedades citotóxicas y un amplio espectro de actividad antitumoral.



Nuestro grupo de investigación, en el Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de Zaragoza, viene trabajando en la química de coordinación y organometálica de oro durante las últimas tres décadas. Se trata de una investigación básica que ha permitido sintetizar un número muy importante de nuevos derivados que, en ocasiones, presentan nuevas situaciones estructurales o de enlace (algunos ejemplos aparecen recogidos en la Figura 1) y que ha alcanzado un claro reconocimiento y aprecio de la comunidad científica internacional. Nuestro interés más reciente se centra en la preparación de compuestos polinucleares de oro en diferentes estados de oxidación, en los que los centros metálicos se encuentren unidos mediante enlaces o interacciones metal-metal.

Epilogo

El oro metálico tiene unas propiedades únicas. En particular, su color amarillo, diferente al del resto de los metales, y su carácter noble que permite que permanezca inalterado con el transcurso del tiempo, incluso frente al ataque de agentes atmosféricos o enzimas biológicas, han permitido que se le haya valorado desde muy antiguo. Otras propiedades, como su buena conductividad eléctrica o su capacidad para reflejar la radiación infrarroja están abriendo nuevos campos de aplicación en la moderna tecnología. Desde el punto de vista químico, el oro muestra también un comportamiento diferente al del resto de los elementos y destaca la gran tendencia que muestra para atraer nuevos centros de oro, con los que puede formar enlaces o interacciones metal-metal en situaciones muy diferentes. Este hecho pone de manifiesto que a nivel atómico o molecular sigue siendo válida la expresión "el oro atrae al oro", tan utilizada en términos económicos. ●

BIBLIOGRAFIA

Libaude, J. (1994). *Minerales de oro en Mundo Científico*, Vol. 14, p 657-664.
 Michaelis, A.R., Ed., (1992). *Interdisciplinary Science Reviews: Gold*, Vol. 17, p 193-392.
 Puddephatt, R.J., (1978). *The Chemistry of Gold*, Elsevier, Amsterdam, 274 pp.
 Puddephatt, R.J., (1987). *Gold in Comprehensive Coordination Chemistry*, Vol. 5, Pergamon, Oxford, p 861-925.
 Schmidbaur, H., (1990). *Gold Bulletin*, Vol. 23, p 11-21.
 Cotton, S.A. (1997). *Chemistry of Precious Metals*, Backie Academic, London, 374 pp.
 Laguna, A y Gimeno, M.C., (1997). *Chemical Reviews*, Vol. 97, p. 511-522.