

# Catálisis Homogénea con oro

Carmen Garrido Pérez, Lucía Barba Feria, Andrea García Romero, María José Velardo Carbajo

**Resumen**—El oro se ha incorporado a la síntesis orgánica más tarde de lo esperado, principalmente debido a la percepción equivocada sobre su baja reactividad en catálisis homogénea. En este texto ofrecemos un breve recuento de los descubrimientos clave que han impulsado una auténtica "fiebre del oro" en los últimos diez años.

**Palabras Claves**— Catálisis, Homogénea, Metal, Oro y Química.

## 1. INTRODUCCIÓN

El oro es un elemento químico cuyo número atómico es 79. Está ubicado en el grupo 11 de la tabla periódica. Es un metal precioso blando de color amarillo dorado. Su símbolo es Au (del latín aurum, 'brillante amanecer'). Además, es uno de los metales más apreciados en joyería por sus propiedades físicas, al tener baja alterabilidad, ser muy maleable, dúctil y brillante, y valorado por su rareza, al ser un metal difícil de encontrar en la naturaleza.



## 2. HISTORIA

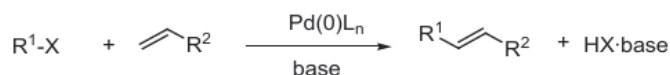
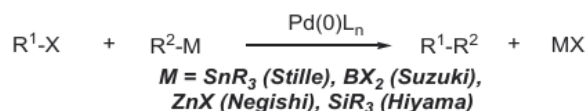
La catálisis con oro no fue bien comprendida hasta principios de la década de 2000. Aunque el oro es un metal noble conocido por su estabilidad, su uso en catálisis homogénea fue limitado debido a la dificultad de controlar su reactividad. A pesar de ser conocido desde la antigüedad, el oro fue uno de los últimos metales en ganar protagonismo en las metodologías de síntesis orgánica. Hasta hace poco, los químicos se centraban en sus enlaces intermetálicos, sus propiedades fotofísicas y su uso en catálisis heterogénea. Sin embargo, en la última década, se ha revelado su gran potencial en catálisis homogénea.

A diferencia de metales como el paladio o el rodio, que son versátiles en las reacciones que catalizan, el oro se destaca como un especialista, con una capacidad única para activar

acetilenos y alenos de manera altamente selectiva y con una reactividad sin igual en la química organometálica.

Hace diez años se realizaron avances clave en la catálisis homogénea con oro, especialmente en las reacciones de cicloisomerización de eninos. Estas reacciones implican la interacción de sustratos que contienen un alqueno y un alquino para formar productos cíclicos de manera intramolecular, sin pérdida de átomos del sustrato original.

En 2004, se publicó un estudio que mostró que los complejos catiónicos de oro (I) eran los catalizadores más activos y selectivos para la cicloisomerización de 1,6-eninos, superando ampliamente a los complejos de platino (II), que eran los más utilizados hasta ese momento. Este estudio fue seguido rápidamente por publicaciones de los grupos de Toste en la Universidad de California en Berkeley y de Fürstner en el Max-Planck-Institut für Kohlenforschung. Aunque estas investigaciones de 2004 marcaron el inicio del importante desarrollo de los catalizadores de oro(I) en síntesis orgánica, es fundamental reconocer que los pioneros en las reacciones de cicloisomerización fueron el grupo de Barry Trost en la Universidad de Stanford, quienes, a finales de la década de 1980, publicaron una serie de trabajos en los que utilizaba complejos de paladio (II) como catalizadores, sentando las bases fundamentales para el posterior desarrollo de la química del oro (I).



### 3. APLICACIONES

Tras este descubrimiento inicial, se realizaron numerosos estudios que expandieron aún más las aplicaciones de los complejos con oro (I).

Entre sus aplicaciones más destacadas se encuentran la adición de nucleófilos a alquinos y las reacciones de ciclación, que permitieron formar productos orgánicos complejos en condiciones suaves y con alta selectividad. Este avance fue especialmente valioso para la síntesis de compuestos bioactivos y moléculas naturales, donde el control preciso de la estructura molecular es crucial.

Además, los complejos de oro (I) demostraron su eficacia en la hidroalquilación de alquenos, una reacción clave para la formación de enlaces carbono-carbono. Esta capacidad permitió desarrollar métodos más eficientes para introducir grupos alquilo en diversas estructuras orgánicas, abriendo nuevas posibilidades en la creación de moléculas complejas.

Los catalizadores de oro (I) también mostraron un gran potencial en reacciones de oxidación selectiva, como la conversión de alcoholes a aldehídos y cetonas, así como en reacciones de reducción, en las que el oro (I) fue capaz de reducir ciertos compuestos metálicos. Estos avances ampliaron significativamente las opciones disponibles para manipular materiales y crear productos químicos valiosos.

En reacciones aún más complejas, los estudios mostraron que los complejos de oro(I) podían intervenir en procesos de metátesis intramolecular y transposición de esqueleto, facilitando la formación de nuevos enlaces carbono-carbono de manera altamente eficiente y ampliando aún más las posibilidades en la síntesis orgánica.

Estas aplicaciones también se extendieron a la creación de compuestos bioactivos. Varios grupos de investigación utilizaron los avances en catálisis con oro(I) para sintetizar productos naturales complejos, como terpenos y otras moléculas bioactivas. Un ejemplo destacado de esto fue la síntesis total del sesquiterpeno antiviral (+)-schisanwilsonene, logrado mediante ciclopropanación intermolecular utilizando complejos de oro(I) como catalizadores. Este tipo de investigaciones ha demostrado el enorme potencial de la catálisis con oro(I) en la producción de compuestos con aplicaciones farmacéuticas, consolidando su rol esencial en la química orgánica moderna.

### 4. FIEBRE DEL ORO

A partir de estos descubrimientos, comenzó lo que se conoce como la "fiebre del oro". La catálisis con oro se expandió rápidamente, convirtiéndose en una de las áreas más prometedoras de la química orgánica. El interés por los catalizadores de oro creció exponencialmente, con investigaciones que exploraban su uso en una amplia variedad de reacciones, incluyendo reacciones de adición, ciclación, y formación de enlaces carbono-carbono. Los complejos de oro(I) demostraron ser altamente eficaces, no solo en reacciones de ciclación de eninos, sino también en otros tipos de transformaciones, como la hidroalquilación de

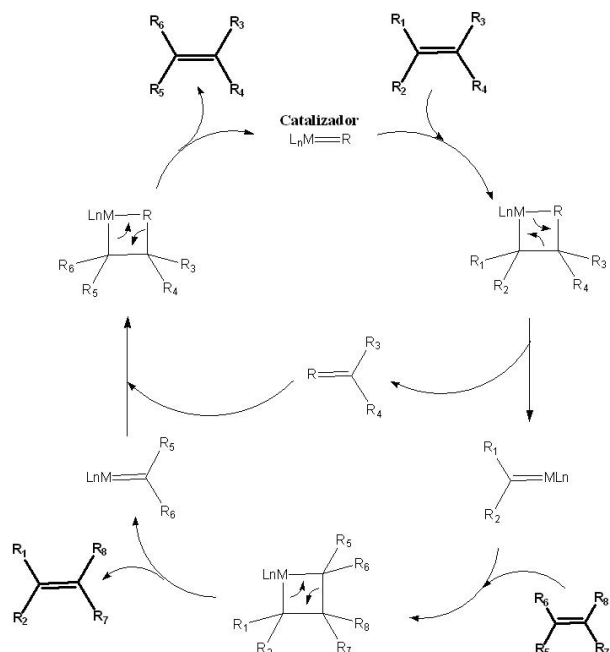
alquenos, la reacción de oxidación y reducciones selectivas. La química del oro (I) también destacó por su versatilidad y su capacidad para llevar a cabo reacciones complejas de manera eficiente. Esto generó un gran interés tanto en la comunidad académica como en la industria, especialmente en la fabricación de productos farmacéuticos, agroquímicos y materiales avanzados.

A medida que avanzaba la investigación en catálisis con oro, los científicos comenzaron a desarrollar nuevas familias de complejos de oro(I) con diferentes ligandos, lo que amplió aún más el rango de reacciones que podían ser catalizadas. Estos avances continuaron a lo largo de la década de 2010, consolidando a la catálisis con oro como una herramienta esencial en la síntesis orgánica moderna.

Hoy en día, la catálisis homogénea con oro sigue siendo un área de gran interés y continúa desarrollándose con nuevas aplicaciones, mejoras en la eficiencia y selectividad de los catalizadores, y avances en la sostenibilidad de los procesos. La "fiebre del oro" no solo ha transformado la investigación académica, sino que también ha tenido un impacto significativo en la química industrial.

### 5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

El uso de catalizadores de oro en catálisis homogénea ha ganado atención en los últimos años debido a sus propiedades únicas y su capacidad para activar reacciones químicas que no son fácilmente alcanzables por otros catalizadores. Sin embargo, como cualquier tecnología, el uso de catalizadores de oro también tiene sus ventajas y desventajas.



## 5.1. Ventajas

- Alta selectividad: el oro es muy eficaz para obtener productos específicos en ciertas reacciones, como oxidaciones o adiciones. Esto es ideal cuando necesitamos evitar subproductos no deseados y dirigir la reacción de manera muy precisa.
- Reacciones a temperaturas suaves: Una de las grandes ventajas del oro es que puede funcionar a temperaturas y presiones relativamente bajas, lo que ayuda a reducir el consumo energético del proceso. Esto lo convierte en una opción atractiva para procesos más sostenibles y económicos.
- Excelente para oxidaciones: El oro es especialmente bueno en reacciones de oxidación, como la conversión de monóxido de carbono (CO) en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), un proceso que no siempre es fácil de conseguir con otros catalizadores.
- Reactividad controlada: El oro en solución puede tener una reactividad bastante controlada, lo que significa que se pueden diseñar sistemas de catálisis más suaves, ideales para reacciones que no toleran condiciones extremas.

## 5.1. Desventaja

- Costo elevado: El oro es un metal caro, por lo que usarlo como catalizador puede ser costoso, especialmente en procesos industriales a gran escala. Esto limita su uso en aplicaciones que requieren grandes cantidades de catalizador.
- Sensibilidad a las condiciones de reacción: Aunque el oro es muy útil en ciertas reacciones, no es invulnerable. Puede volverse menos eficaz si las condiciones de la reacción (como la temperatura o el pH) no son las adecuadas. Además, en algunos casos puede aglomerarse u oxidarse, perdiendo actividad.
- Limitación en el tipo de reacciones: No todas las reacciones pueden beneficiarse de los catalizadores de oro. Aunque son fantásticos en algunas áreas como las oxidaciones, en otras reacciones más complejas no siempre son efectivos o rentables.
- Dificultad para regenerarlos: Si el catalizador de oro pierde su efectividad, regenerarlo no siempre es fácil. A veces, requiere condiciones especiales, lo que puede hacer que no sea tan práctico para algunos procesos continuos.
- Escalabilidad: Aunque el oro funciona bien en el laboratorio, trasladarlo a procesos industriales a gran escala sigue siendo un desafío. La química del oro en solución no está tan desarrollada como la de otros metales, lo que limita su uso en la práctica.
- Posibles efectos tóxicos: Aunque el oro no suele ser tóxico, en algunos casos, las impurezas o la migración de especies de oro en una reacción pueden generar efectos no deseados o incluso tóxicos.

## 6. CONCLUSIONES

El artículo resalta cómo este metal, históricamente subestimado en catálisis homogénea, ha ganado protagonismo en la química orgánica moderna. A pesar de su reputación como un metal noble inerte, avances clave a partir de la década de 2000 han revelado su alta reactividad y selectividad en reacciones específicas como la cicloisomerización de eninos, la hidroalquilación y las reacciones de oxidación y reducción.

El uso de complejos catiónicos de oro(I) ha permitido desarrollar métodos eficientes para sintetizar moléculas complejas con aplicaciones en áreas como la farmacéutica y la química de materiales. Sin embargo, se enfrentan desafíos como el costo elevado del metal, limitaciones en ciertas reacciones y dificultades para escalarlos a nivel industrial.

En conclusión, la catálisis homogénea con oro ha transformado significativamente el panorama de la síntesis orgánica, destacándose por su selectividad, eficiencia y versatilidad, aunque aún requiere superar barreras económicas y técnicas para su adopción masiva en la industria.

## REFERENCIAS

- [1] Hashmi, A. S. K., Homogeneous Gold Catalysis: New Perspectives in Organic Synthesis, *Chemical Reviews*, 107(11), 3180–3211, 2007.
- [2] Gorin, D. J. & Toste, F. D., Relativistic Effects in Homogeneous Gold Catalysis, *Nature*, 446(7135), 395–403, 2007.
- [3] Fürstner, A., Gold Catalysis in Total Synthesis: A Journey to the Center of the Gold World, *Angewandte Chemie International Edition*, 48(21), 3866–3878, 2009.
- [4] Echavarren, A. M., Gold Catalysis: New Developments in Organic Synthesis, *Accounts of Chemical Research*, 41(10), 1521–1530, 2008.
- [5] Marion, N. & Nolan, S. P., N-Heterocyclic Carbenes in Gold Catalysis, *Coordination Chemistry Reviews*, 252(19–20), 2383–2393, 2008.



Carmen Garrido, Lucia Barba, María José Velardo, Andrea García, Grado en Química, 4º curso.