

Una Comparación de Reactivos Alternos al Cianuro como Lixiviantes del Oro: Una revisión

Jesus Martín Galvan Lira¹

galvanjesus@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0005-9067-2920>

Universidad Autónoma de Coahuila
México

Ma. de Jesús Soria Aguilar

ma.soria@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3910-7772>

Universidad Autónoma de Coahuila
México

Francisco Raul Carrillo Pedroza

raul.carrillo@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0413-0676>

Universidad Autónoma de Coahuila
México

Elsa Nadia Aguilera González

elsaaguilera@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6289-5992>

Universidad Autónoma de Coahuila
México

RESUMEN

El oro es un metal de gran interés en áreas como la ingeniería, la joyería y las finanzas, es por ello por lo que hay un gran interés en la investigación de técnicas de recuperación de oro de diversas fuentes, como los minerales o los desechos electrónicos. Existen múltiples solventes que son capaces de formar complejos con el oro, como por ejemplo el yodo, tiourea, tiosulfato, tiocianato, glicina y el cianuro; este último siendo el más utilizado a escala industrial. En el presente artículo se revisan los reactivos más utilizados para la lixiviación del oro analizando su panorama mediante herramientas de mapeo bibliográfico en los últimos 5 años, usando estas herramientas se concluye que a pesar la relevancia con la que cuentan los sistemas libres de cianuro para la disolución de oro, el cianuro seguirá siendo relevante tanto industrialmente por sus ventajas operativas y económicas como en materia científica buscando formas de mitigar sus efectos dañinos.

Palabras clave: oro; lixiviación; cianuración; mapas bibliográficos

¹ Autor principal

Correspondencia: galvanjesus@uadec.edu.mx

A Comparison of Alternative Reagents to Cyanide as Lixiviants Gold: A review

ABSTRACT

Gold is a metal of great interest in areas such as engineering, jewelry and finance, which is why there is great interest in research into gold recovery techniques from various sources, such as minerals or electronic waste. There are multiple solvents that are capable of forming complexes with gold, such as iodine, thiourea, thiosulfate, thiocyanate, glycine and cyanide; the latter being the most used on an industrial scale. In this article, the most used reagents for gold leaching are reviewed, analyzing their panorama using bibliographic mapping tools in the last 5 years. Using these tools, it is concluded that despite the relevance of cyanide-free systems for the dissolution of gold, cyanide will continue to be relevant both industrially due to its operational and economic advantages and in scientific matters seeking ways to mitigate its harmful effects.

Keywords: gold; leaching; cyanidation; bibliographic maps

*Artículo recibido 15 noviembre 2023
Aceptado para publicación: 26 diciembre 2023*

INTRODUCCIÓN

El oro es un metal muy denso, con una densidad de 19,32 g/cm³. Es también un metal muy maleable y dúctil, características que, junto a su baja reactividad química, le permiten ser acuñado fácilmente en monedas y joyería (ASM International Handbook Committee, 1998).

En la naturaleza, el oro se encuentra diseminado en minerales de cuarzo y películas de baja ley que lo contienen. Es altamente estable en presencia de agua y de soluciones acuosas en un amplio espectro del pH; no le afecta el aire seco, incluso a altas temperaturas (Marsden & House, 2006).

El oro presente en la superficie terrestre es relativamente escaso y difícil de encontrar en grandes vetas. Las concentraciones de oro en los minerales suelen ser bajas, de unos pocos gramos por tonelada. Esto hace que la extracción de oro sea un proceso costoso y complejo. También puede encontrarse contenido en desechos electrónicos, los cuales son toda clase de residuos de dispositivos como celulares, tabletas, computadoras, refrigeradores o lavadores, dentro de sus componentes se encuentran toda clase de metales preciosos que se utilizan por sus destacadas propiedades mecánicas y eléctricas, principalmente en los circuitos impresos de las placas y en los procesadores de computación y gráficos (Noroña Alarcón et al., 2019).

Herramientas de búsqueda de artículos científicos

Los buscadores de documentos académicos se han convertido en el recurso más llamativo a la hora de buscar artículos científicos en la web, bases de datos como la de Web of Science o Scopus son de los más utilizados y eficientes, pero tienen la desventaja de que para acceder a ellos se debe pagar. Es por ello que sitios como el de Google Académico o los servicios de búsqueda de las grandes revistas y publicadores se toman como la primer opción para los investigadores que deseen acceder a datos científicos específicos (Equipo de redacción de Paperpile, n.d.).

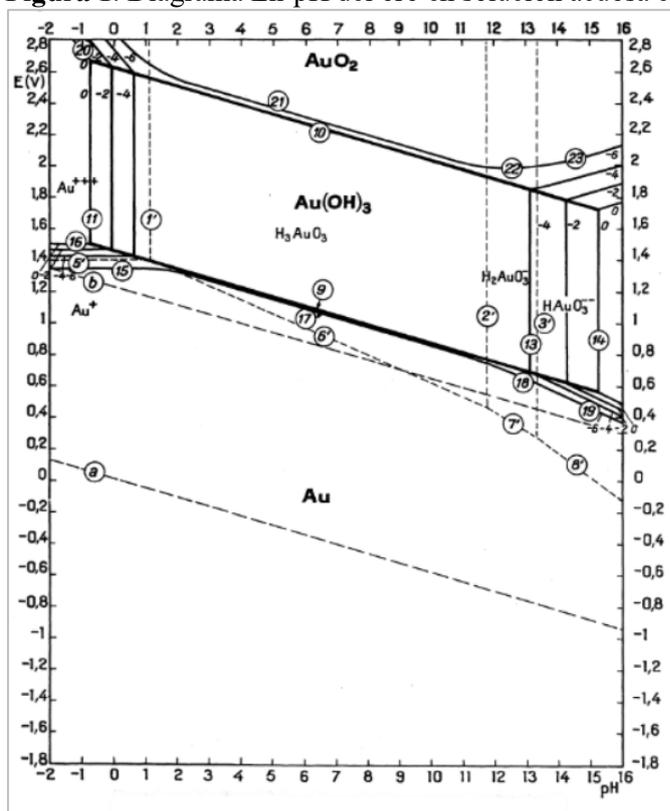
Por otra parte, las herramientas de mapeo bibliográfico como Inciteful, Litmaps o Research Rabbit muestran la información buscada de manera gráfica, relacionando los artículos seleccionados y sugiriendo artículos y publicaciones relacionadas con los mismos. En particular, Inciteful ofrece varias herramientas además del mapeo bibliográfico de los artículos, también muestra, a forma de lista, los artículos y publicadores más prolíficos en el área, así como comparaciones en el impacto y relevancia

de las publicaciones mediante la herramienta PageRank de Google la cual, similar a un factor de impacto, asigna un valor que mide que tan relevante es dicho documento (Weishuhn, 2023).

Métodos de lixiviación de oro

En el contexto de la extracción del oro, la lixiviación es la disolución de un metal o mineral en un líquido. La reacción más importante en la disolución del oro en solución acuosa requiere tanto de un agente complejante como de un oxidante para alcanzar niveles aceptables de lixiviación (Marsden & House, 2006). Pourbaix en 1974 en su libro Atlas del equilibrio electroquímico en soluciones acuosas muestra el diagrama Eh-pH para el oro en solución acuosa en ausencia de reactivos que disuelvan este metal, este diagrama de muestra en la Figura 1 (Pourbaix, 1974).

Figura 1. Diagrama Eh-pH del oro en solución acuosa en ausencia de lixiviantes



Pourbaix, 1974

En la Figura anterior se muestra la estabilidad del oro variando el pH de la solución en función del potencial electroquímico. Con base en el diagrama se muestra una gran estabilidad del oro a los cambios de pH en condiciones reductoras, neutras y levemente oxidantes. Debido a esto, la disolución de oro requiere de un sistema acuoso que contenga un fuerte componente oxidante para que reaccione con el oro y lo disuelva.

La lixiviación de oro es un proceso químico que se utiliza para extraer el oro de los minerales o desechos electrónicos que lo contengan disolviendo selectivamente (Jorjani & Askari, 2022). La lixiviación se utiliza en una variedad de operaciones mineras, desde pequeñas minas artesanales hasta grandes minas industriales, pudiendo tomar como fuente el oro contenido en minerales como también de residuos electrónicos (Ubalini et al., 1998).

Teniendo en cuenta que, actualmente, el oro puede extraerse a partir de desechos electrónicos como de minerales de diversas composiciones, también existen una gran cantidad de disolventes para cada una de estas operaciones y que las condiciones de operación y eficiencias dependerán en gran medida de las características de la fuente.

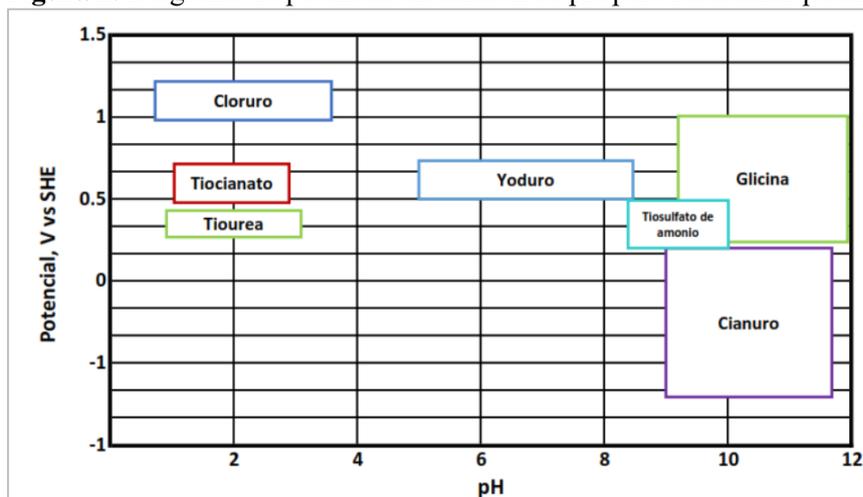
En un principio el oro estaba presente en la superficie de la Tierra de manera abundante, las personas iban a los ríos y recogían pepitas de varios gramos de oro, conforme pasaron las épocas, se fueron necesitando de procesamientos de minerales cada vez más sofisticados como la gavitometría y de técnicas de extracción nuevas para la obtención de oro. Así, en el siglo XIX el uso del gas cloro como método de extracción de oro empezó a tomar relevancia y a desplazar la amalgamación como lixivante (Marsden & House, 2006).

Se han definido tres criterios importantes para considerar la efectividad de un lixivante adecuado para el oro, estos son: bajo costo, baja toxicidad y alta velocidad de reacción (Gos & Rubo, 2001).

Algunos de los reactivos más estudiados para la disolución del oro son la glicina (Garza-Román et al., 2021); mezclas de halógenos/halogenuros (La Brooy et al., 1994); compuestos derivados del azufre como el tiosulfato (Baloyi et al., 2022), la tiourea (Borda & Torres, 2022) y el tiocianato (Azizitorghabeh et al., 2021); así como el lixivante por excelencia de minerales de metales preciosos, el cianuro (Marsden & House, 2006).

En la Figura 2 se muestra un gráfico donde se indican algunos de los reactivos que son usados como lixivantes del oro, así como las condiciones electroquímicas que propician su reacción frente al oro.

Figura 2. Diagrama de potencial en función de pH para soluciones potenciales para lixiviar el oro



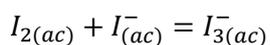
Adaptada de Hilario Mallma & Ramos Coronado, 2020

Yodo/Yoduro

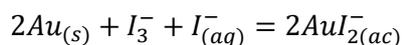
Los halógenos son capaces de disolver el oro bajo las condiciones adecuadas de oxidación. La lixiviación de oro con bajo un sistema halógeno/halogenuro es un proceso químico que utiliza una solución que involucra a un halógeno en su forma elemental y a su respectivo ion para generar un disolvente para el oro. El proceso es menos tóxico que la lixiviación con cianuro, pero también es menos eficiente (Liu et al., 2022).

La lixiviación de oro con yodo/yoduro es un proceso relativamente nuevo, no estandarizado, y que aún se encuentra en desarrollo. Sin embargo, el proceso tiene el potencial de convertirse en una alternativa viable a la lixiviación con cianuro, especialmente para la lixiviación de oro contenido en residuos electrónicos (Moreno-Cedillos et al., 2022).

En el sistema yodo/yoduro la reacción que funge como origen del precursor que disuelve al oro se aprecia a continuación:



La reacción química que se lleva a cabo en la lixiviación de oro con yodo/yoduro es la siguiente:

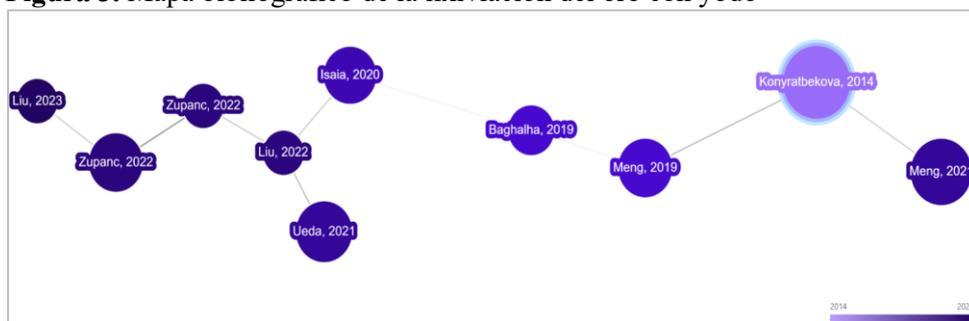


En esta reacción, el oro reacciona por la acción complejante del ion I_3^- y la acción oxidante del ion I^- .

El yoduro es un agente oxidante más débil que el cianuro, por lo que la reacción es más lenta, por otro lado, posee un rango de pH amplio en el que es efectivo (Birich et al., 2023).

Actualmente las investigaciones relacionadas a la disolución de oro mediante el sistema yodo/yoduro van enfocadas a mejorar el rendimiento del yodo como lixiviante para tarjetas electrónicas. Partiendo del artículo publicado por Konyratbekova en 2014, en él se habla acerca de la reacción de disolución de oro sin cianuro utilizando yodo (Konyratbekova et al., 2014). Mediante la herramienta de búsqueda de artículos “inciteful.xyz” se redujeron los resultados de búsqueda mediante las palabras claves: “iodine AND gold”; y se seleccionaron solo los artículos publicados entre 2019 y 2023, los resultados se muestran en la Figura 3.

Figura 3. Mapa bibliográfico de la lixiviación del oro con yodo



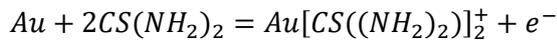
Al analizar la sección de “artículos más importantes” del sitio Inciteful se muestra que los artículos con más relevantes son los que se centran en mejorar el rendimiento del solvente para que sea una cada vez más eficiente utilizando reactivos auxiliares como, por ejemplo, el etanol (Zupanc et al., 2022). También, es de gran interés la recuperación de oro desde estas soluciones de yoduro por el métodos como el de electrorecuperación.

Tiourea

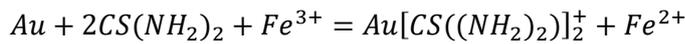
La lixiviación de oro con tiourea es un proceso químico que utiliza una solución de tiourea para disolver el oro. A pesar de que el uso de la tiourea como solvente para el oro ha sido reportado desde la primera mitad del siglo XX, las aplicaciones industriales han sido más bien pocas debido a la hegemonía de los procesos que involucran cianuro. Aún con ello, la tiourea es un compuesto químico menos tóxico y más selectivo para el oro que el cianuro, siendo limitado principalmente por el alto consumo de reactivos que involucra su uso (Borda & Torres, 2022; Ray et al., 2022).

La tiourea es capaz de disolver el oro procedente tanto de fuentes minerales, sean estas oxidadas o de sulfuros, como de desechos electrónicos, siendo de especial interés esta última.

La tiourea es soluble en soluciones acuosas con pH bajo y en presencia de un agente oxidante son capaces de formar un compuesto estable con el oro como se aprecia en la ecuación siguiente:



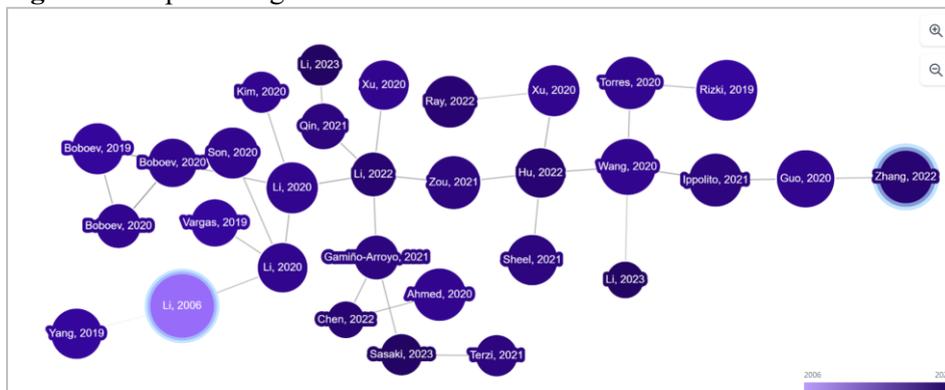
Las condiciones del medio de disoluciones más aptas para la lixiviación del oro con tiourea se reportan que son en presencia del ion férrico y ácido sulfúrico como se muestra en la ecuación siguiente:



En esta reacción, el oro se oxida desde su estado elemental hasta un estado de oxidación “+3”, formando un complejo de tiourea de oro. El proceso es más rápido que la lixiviación con cianuro, pues la tiourea es un agente oxidante más fuerte (Munganyinka et al., 2022).

En la Figura 4 se muestra un mapa bibliográfico en el que se reúnen, mediante la herramienta de mapeo “inciteful.xyz” los artículos relacionados al artículo de 2006 (J. Li & Miller, 2006) por Jinshan Li, los criterios de búsqueda fueron por año: entre 2019 y 2023 y mediante las palabras clave: “gold AND thiourea”).

Figura 4. Mapa bibliográfico de la lixiviación del oro con tiourea

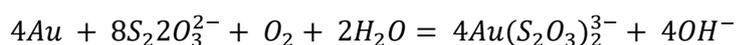


El análisis del anterior diagrama muestra que las investigaciones actuales sobre la lixiviación del oro usando tiourea van desde la lixiviación de minerales, sulfurosos y oxidados hasta la lixiviación de residuos electrónicos. Entre las líneas de investigación más destacadas se tienen la biolixiviación desde residuos electrónicos (Rizki et al., 2019) y de la mano con la lixiviación, los mejores métodos de recuperación para este proceso, destacándose la electrodeposición (Ippolito et al., 2021; Ray et al., 2022).

Tiosulfato

La lixiviación de oro con tiosulfato es un proceso más rápido y eficiente que la lixiviación con cianuro. El proceso también es más selectivo para el oro, lo que reduce la cantidad de impurezas que se disuelven en la solución de lixiviación (Xie et al., 2021).

La reacción química que se lleva a cabo en la lixiviación de oro con tiosulfato es la siguiente:



En esta reacción, el oro se oxida a un estado de oxidación “+1”, formando un complejo de tiosulfato de oro. El proceso es más rápido que la lixiviación con cianuro porque el tiosulfato es un agente oxidante más fuerte (Baloyi et al., 2022).

El tiosulfato es considerado como el reactivo más prometedor para lixiviar minerales de oro que contienen también cobre o son de naturaleza carbonosa cuando el cianuro no es una opción. Aun con esto, el tiosulfato tiene sus limitaciones, generalmente la recolección de oro es menor y el consumo de reactivos es mayor comparado con el cianuro.

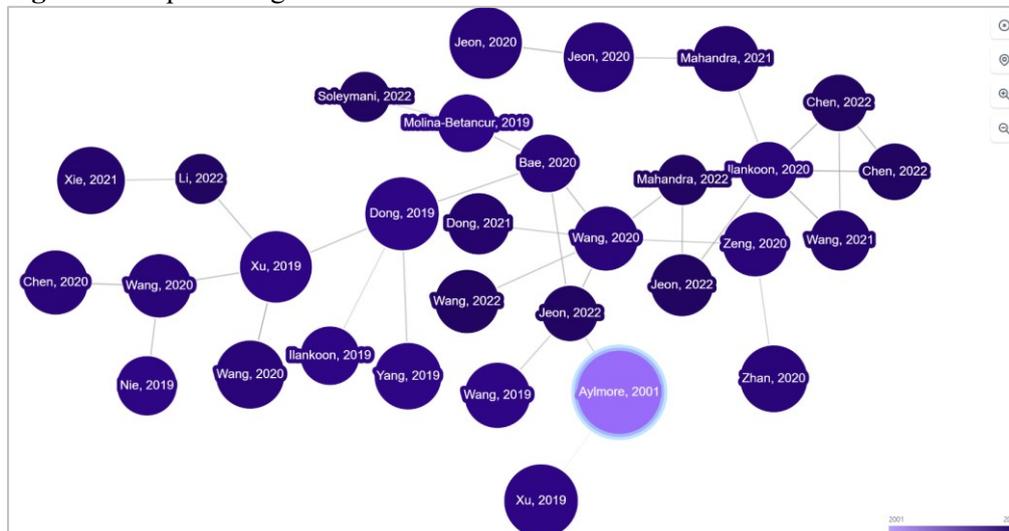
Para su operación, es indispensable utilizar un reactivo oxidante adicional, en general el ion cobre divalente sirve como oxidante mientras que la amoniaco actúa como estabilizador del complejo formado y previene que estos precipiten en una solución alcalina. Por otra parte, el uso de amoniaco no solo incrementa la complejidad del sistema de lixiviación, sino también incrementa la inestabilidad de la amoniaco. Además, la presencia de la amoniaco en el sistema producirá una cantidad considerable de desechos que contendrán amoniaco o amonio, pudiendo contaminar las cercanías con estos compuestos. Además del cobre, los iones de níquel y cobalto también pueden fungir como oxidantes en un sistema tiosulfato y amoniaco, pero con la desventaja de que estos últimos son reactivos menos costables.

También se han investigado sistemas de tiosulfatación que no requieren el uso de amoniaco, sobre todo para la extracción de minerales refractarios, en estos sistemas, el uso de ligandos orgánicos que contienen grupos funcionales amino, carboxilo e hidroxilo pueden reducir el consumo del tiosulfato e incrementar ligeramente la velocidad de lixiviación del oro comparada con el sistema que usa amoniaco (Xie et al., 2021).

En la Figura 5 se muestra un diagrama bibliográfico en el que se reúnen, mediante la herramienta de mapeo “inciteful.xyz” las publicaciones relacionados al artículo de 2001 de Mark Aylmore, los criterios

de búsqueda fueron por año: entre 2019 y 2023 y mediante las palabras clave: “gold AND thiosulfate” (Aylmore & Muir, 2001).

Figura 5. Mapa bibliográfico de la lixiviación del oro con tiosulfato



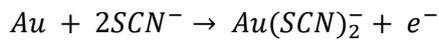
Mediante el diagrama anterior se aprecia que las investigaciones en los últimos 5 años sobre la lixiviación de oro con tiosulfato se orientan en la disolución de minerales con contenidos de oro, y encontrar los parámetros más adecuados para la tiosulfatación, variando tanto el medio de disolución como los iones oxidantes (Wang et al., 2020). Una vez lixiviado el mineral, es de especial interés el encontrar técnicas de recuperación eficaces y eficientes, destacándose las resinas de intercambio (Xu et al., 2019) y la cementación (Jeon et al., 2022).

Tiocianato

La lixiviación de oro con tiocianato es un proceso que se utiliza principalmente para el tratamiento de minerales refractarios. El proceso es mucho menos nocivo tanto para los seres humanos como para los organismos acuáticos que la lixiviación con cianuro, además, comparado con la tiourea o el tiosulfato, los sistemas de lixiviación con tiocianato consumen menor cantidad de reactivo disminuyendo el costo de operación, además de tener mejor estabilidad que la tiourea en muchos medios. Una de las principales razones por las que la lixiviación de oro con tiocianato no ha sido comercializada es que el proceso requiere de un potencial redox mayor que el que es requerido para la lixiviación con cianuro (Azizitorghabeh et al., 2021).

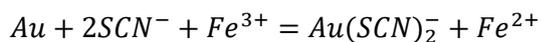
La lixiviación con tiocianato es una reacción electroquímica que sucede en un pH de 1.5-2.5 y a un potencial electroquímico de 600 a 700 mV.

La reacción química que se lleva a cabo en la lixiviación de oro con tiocianato es la siguiente:



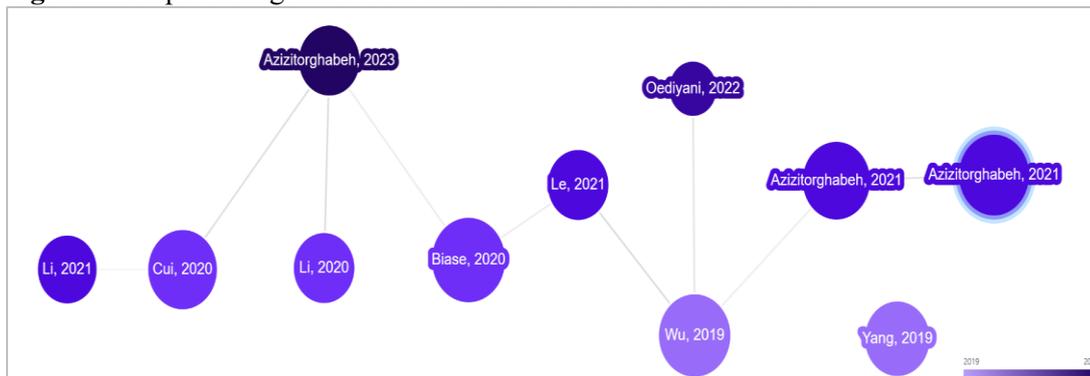
En esta reacción, el oro se oxida a un estado de oxidación “+1”, formando un complejo de tiocianato de oro (Rezaee et al., 2022).

Una de las ventajas del tiocianato como lixiviante para el oro es que es utilizado a pH bajo, permitiendo la presencia del ion férrico ‘Fe³⁺’ el cual es el oxidante más adecuado para la reacción con el oro como se muestra en la siguiente reacción:



En la Figura 6 se muestra un diagrama bibliográfico en el que se reúnen, mediante la herramienta de mapeo “inciteful.xyz” los artículos relacionados al artículo de 2021 por Atefeh Azizitorghabeh, los criterios de búsqueda fueron por año: entre 2019 y 2023 y mediante las palabras clave: “gold AND thiocyanate” (Azizitorghabeh et al., 2021).

Figura 6. Mapa bibliográfico de la lixiviación del oro con tiocianato



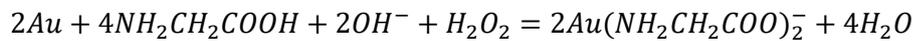
El diagrama anterior muestra que las investigaciones actuales sobre la lixiviación de oro utilizando tiocianato están enfocadas en la lixiviación de minerales de diferente composición (Azizitorghabeh et al., 2021; Le et al., 2022), además de, una vez realizada la lixiviación, los métodos de recuperación más efectivos para extraer el oro desde las soluciones que lo contienen, siendo los más prometedores la extracción por solventes, la cementación y la adsorción con carbón activado y membranas de intercambio iónico (Azizitorghabeh et al., 2021).

Glicina

La lixiviación con glicina ofrece ventajas sobre otros sistemas de lixiviación como lo son estabilidad en amplio rango de potencial y pH, fácil reutilización y baja toxicidad (Altinkaya et al., 2020).

Además del aurocianuro, el complejo de glicinato de oro posee la estabilidad más alta comparada con los complejos formados por los haluros, el tiosulfato y el tiocianato (Aylmore, 2016).

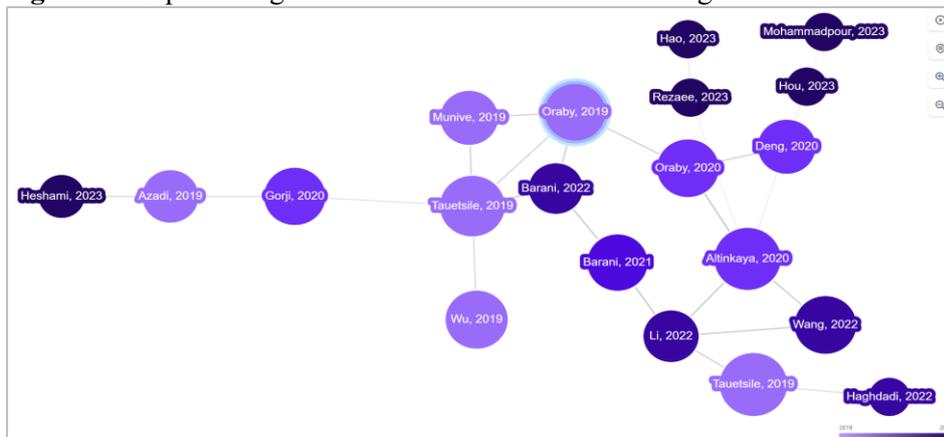
La reacción del oro con glicina acompañada de peróxido de hidrogeno se muestra en la siguiente reacción:



En esta reacción los parámetros de concentración de glicina, temperatura, pH y concentración de peróxido tienen un gran impacto en la disolución del oro. Además, la presencia de iones cúpricos muestra un efecto catalítico en la reacción de disolución.

En la Figura 7 se muestra un diagrama bibliográfico en el que se reúnen, mediante la herramienta de mapeo “inciteful.xyz” los artículos relacionados al artículo de 2019 por Oraby, los criterios de búsqueda fueron por año: entre 2019 y 2023 y mediante las palabras clave: “gold AND glycine” (Oraby et al., 2019).

Figura 7. Mapa bibliográfico de la lixiviación del oro con glicina



El diagrama anterior muestra que las investigaciones actuales sobre la lixiviación de oro utilizando glicina abarcan campos como la lixiviación de residuos electrónicos (Han et al., 2020) y de minerales de diversas naturalezas (N. Picazo-Rodríguez et al., 2022). Las investigaciones se centran en la optimización de sistemas utilizando otros lixiviantes, por ejemplo, los sistemas glicina-tiosulfato para mejorar la estabilidad de los reactivos y reducir el consumo de estos (Munive et al., 2020); o los sistemas cianuro-glicina para minimizar el consumo de cianuro (N. G. Picazo-Rodríguez et al., 2022).

Cianuro

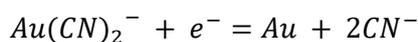
El cianuro es utilizado universalmente debido a su relativamente bajo costo, su gran capacidad de disolver el oro (y plata), y por su selectividad por el oro y la plata por sobre otros metales. También, a pesar de las preocupaciones sobre la toxicidad del cianuro, este puede ser utilizado con escasos riesgos para la salud y el medio ambiente. El oxidante más común usado para la cianuración es el oxígeno, el cual es suministrado por el aire, esta es una de las razones por las cuales el proceso es tan atractivo.

Los diferentes procesos desarrollados para la cianuración incluyen la lixiviación con agitación, la lixiviación en montones o cianuración intensiva.

La lixiviación de oro mediante un sistema de cloro-cloruro fue introducida comercialmente desde el siglo XIX, pero su uso fue disminuyendo con la introducción de procesos relacionados con el cianuro a finales del siglo XIX. Los procesos con reactivos alternos al cianuro como lo son el tiosulfato, tiourea, tiocianato, amoníaco, sulfuros alcalinos y demás haluros; han sido investigados profusamente en investigaciones recientes, pero hay pocos registros de su implementación a gran escala en la industria (Marsden & House, 2006; Ponghiran et al., 2021).

La lixiviación con cianuro es un proceso que se utiliza para extraer oro de una amplia gama de minerales, incluyendo minerales de oro primario, minerales de oro secundario y minerales de oro refractarios (Faraji et al., 2022; Medina & Anderson, 2020). La cianuración es un proceso atractivo también para la extracción de oro contenido en residuos electrónicos (Das et al., 2017).

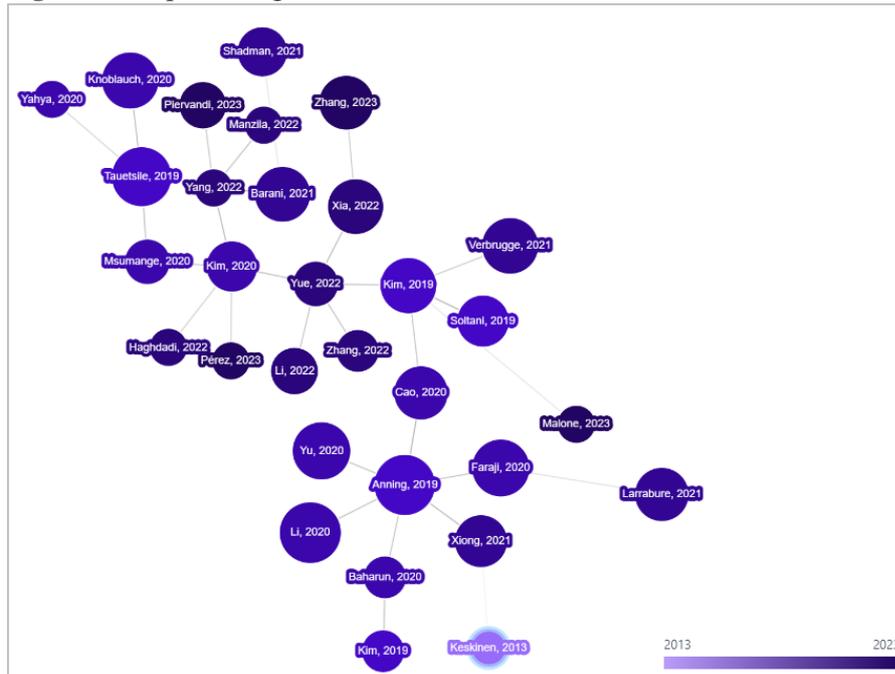
En una solución alcalina de cianuro en medio acuoso, el oro se disuelve y es oxidado comúnmente a su forma aurosa componiendo el complejo de aurocianuro $(Au(CN)_2)^-$. Para fines prácticos, la reacción de disolución puede ser expresada como:



En esta reacción, el oro se oxida a un estado de oxidación “+1”, formando un complejo de cianuro de oro (H. Li et al., 2021).

En la Figura 8 se muestra un diagrama bibliográfico en el que se reúnen, mediante la herramienta de mapeo “inciteful.xyz”, las publicaciones relacionadas al artículo de 2013 publicado por Simo Keskinen, los criterios de búsqueda fueron por año: entre 2019 y 2023 y mediante las palabras clave: “gold AND cyanide NOT cyanide free NOT alternatives”) (Keskinen, 2013).

Figura 8. Mapa bibliográfico de la lixiviación del oro con cianuro



El diagrama anterior muestra que las investigaciones relacionadas con la lixiviación del oro con cianuro van encaminadas a reducir el consumo de cianuro en el proceso de disolución, ya sea adicionando nitrato de plomo como catalizador (Soltani et al., 2020), variando la fuente del reactivo usando cianuro biogénico (Faraji et al., 2021), o al utilizar sistemas de disolución compuestos por cianuro y otro solvente para el oro, como los sistemas cianuro-tiosulfato o el cianuro-glicina (Manzila et al., 2022). Al ser un método ya establecido de disolución, las investigaciones suelen estar relacionadas más a cómo lidiar con los efectos nocivos que tiene este reactivo, es común encontrar artículos hablando de remediación de suelos, descomposición de cianuro o tratamiento de aguas con contenidos de cianuro (Xiong et al., 2021).

Panorama de los lixiviantes del oro

Anteriormente se ha dado una explicación del funcionamiento y estado actual de las investigaciones y rutas de investigación de cada uno de los principales reactivos para la lixiviación de oro. En la Tabla I se muestra la interacción de los reactivos con el oro, así como sus principales ventajas y desventajas.

Tabla I. Estado actual de los reactivos para lixiviación de oro y sus características

Reactivo de disolución	Yodo/yoduro	Referencia
Reacción química:	$2\text{Au} + \text{I}_3^- + \text{I}_{(\text{aq})}^- = 2\text{AuI}_2^-$	(Jorjani & Askari, 2022;
pH:	5-9	La Brooy et al.,
Agente oxidante:	Ion yoduro	1994)
Estado tecnológico:	Laboratorio	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Su alta selectividad con el oro, hacen que el excedente de reactivo pueda ser recuperado. ▪ Corto tiempo de lixiviación (1 hora) ▪ Recuperación total del oro. 	
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contenidos de plata, cobre y plomo tienen efectos negativos en el proceso. ▪ Menos tóxico que el cianuro. ▪ Puede ser trabajado en un amplio rango de pH. 	
Reactivo de disolución	Tiourea	Referencia
Reacción química:	$\text{Au} + 2\text{CS}(\text{NH}_2)_2 = \text{Au}[\text{CS}((\text{NH}_2)_2)]_2^+ + e^-$	(Borda & Torres, 2022; J.
pH:	1-3	Li & Miller,
Agente oxidante:	Sulfato férrico o disulfuro de formamidina	2006; Ray et al.,
Estado tecnológico:	Laboratorio	2022)
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta velocidad de reacción (1 hora) ▪ Baja toxicidad. ▪ Alta eficiencia. ▪ Ecológicamente amigable. ▪ Baja interacción con otros iones. ▪ Reactivo fácil de manejar. ▪ Alta sensibilidad por el oro. 	
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Al oxidarse se consume rápidamente. ▪ Se degrada fácilmente si no se controlan las rigurosamente las operaciones. ▪ Alto consumo de reactivos. 	

Reactivo de disolución	Tiosulfato	Referencia
Reacción química:	$4\text{Au} + 8\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-} + 4\text{OH}^-$	(Aylmore & Muir, 2001;
pH:	8.5-9.5	Munive et al.,
Agente oxidante:	Sulfato de cúprico	2020; Xie et al.,
Estado tecnológico:	Proceso utilizado a nivel industrial	2021)
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bajo costo del reactivo. ▪ Baja toxicidad. ▪ Alta velocidad de reacción (2 horas) . ▪ Alta efectividad al reaccionar con oro contenido en minerales carbonosos. 	
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dificultad de aplicarse a escala industrial. ▪ Dificultad de reutilizar el reactivo. ▪ Menor recuperación con respecto al cianuro. ▪ Alto consumo de reactivo. ▪ Bajo poder oxidante. 	
Reactivo de disolución	Tiocianato	Referencia
Reacción química:	$\text{Au} + 2\text{SCN}^- \rightarrow \text{Au}(\text{SCN})_2^- + \text{e}^-$	(Azizitorghabeh et al., 2021)
pH:	1-3	
Agente oxidante:	Sulfato férrico	
Estado tecnológico:	Laboratorio	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta recuperación. ▪ Alta cinética inicial del proceso. ▪ Menor tiempo del proceso respecto al cianuro (24 horas) ▪ Alta estabilidad de los complejos formados. ▪ Baja toxicidad. 	
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menor selectividad hacia el oro comparado con el cianuro. ▪ Menor eficiencia con respecto al cianuro. 	

Reactivo de disolución	Glicina	Referencia
Reacción química:	$2Au + 4NH_2CH_2COOH + 2OH^- + H_2O_2 \rightarrow 2Au(NH_2CH_2COO)_2^- + 4H_2O$	(Altinkaya et al., 2020;
pH:	9-12	Jamett et al., 2023; Oraby & Eksteen, 2015)
Agente oxidante:	Peróxido de hidrógeno	
Estado tecnológico:	Laboratorio	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baja toxicidad. ▪ Biodegradable. ▪ No volátil. ▪ Compatibilidad y sinergia con otros sistemas de lixiviación. ▪ Menor consumo de reactivo comparado con otros sistemas. ▪ Bajo impacto sobre los equipos por corrosión. 	
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cinética de lixiviación lenta (24 horas). 	
Reactivo de disolución	Cianuro	Referencia
Reacción química:	$Au + 2CN^- \rightleftharpoons Au(CN)_2^- + e^-$	(Logsdon et al., 1999; Marsden & House, 2006;
pH:	>9	Yu et al., 2020)
Agente oxidante:	Oxígeno en el aire	
Estado tecnológico:	Principal método de lixiviación industrial a nivel global	
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta eficiencia. ▪ Bajo costo de proceso. ▪ Es un proceso relativamente selectivo. ▪ Se puede aplicar para extraer oro contenido en distintos tipos de depósitos. ▪ Es un proceso relativamente rápido y sencillo de implementar. ▪ A escala industrial no es necesario un control exhaustivo del proceso. 	
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Limitaciones en el proceso a bajas temperaturas. • Altamente venenoso. • Dificultad de procesamiento en desechos. • Cinética de lixiviación lenta (procesos de 72 horas). 	

En la actualidad, es de interés para la población en general el buscar una alternativa al cianuro como lixiviante para los minerales de oro, este reactivo es altamente venenoso y produce una gran cantidad de desechos que presentan una dificultad muy alta en su procesamiento posterior (Azizitorghabeh et al., 2021; Borda & Torres, 2022; Jorjani & Askari, 2022; Xie et al., 2021). Por ello, se está trabajando en medir la eficiencia de distintos reactivos menos tóxicos para las personas y el medio ambiente; entre estos reactivos se encuentran el Iodo, que, al igual que alguno de los haluros, posee la capacidad de disolver el oro con una gran selectividad y a gran velocidad y presenta la ventaja de que el excedente de reactivo utilizado puede ser recuperado para ser utilizado posteriormente en lixiviaciones futuras (Jorjani & Askari, 2022).

Los solventes de la familia de los tioles también son capaces de disolver el oro contenido en minerales, siendo estos procesos altamente eficientes, con baja toxicidad y considerablemente menos tóxicos que el cianuro con potenciales aplicaciones industriales (Azizitorghabeh et al., 2021a; Borda & Torres, 2022; XIE et al., 2021a).

La glicina es una alternativa relativamente nueva que presenta una gran cantidad de ventajas respecto a los demás reactivos con las desventajas de ser un reactivo con lixiviación relativamente lenta (aunque más rápida que el cianuro). La glicina se suele utilizar principalmente en conjunto con otros reactivos formando sistemas glicina-tiosulfato, glicina-cianuro, etc.

Además de los reactivos anteriores, desde hace pocos años se han estado investigado los solventes eutécticos profundos, soluciones compuestas de un catión orgánico con un anión que puede ser tanto orgánico como inorgánico reaccionando mediante enlaces iónicos, ejemplo de estos solventes son los sistemas de cloruro de colina con urea. Estos solventes se caracterizan por su baja volatilidad y su gran poder disolvente, es debido a esto que estos reactivos son capaces de disolver el oro nativo así como también el telurio y otros metales preciosos (Jenkin et al., 2016; Sánchez et al., 2019). La biolixiviación de oro ofrece varias ventajas, como una menor utilización de sustancias químicas tóxicas, una reducción en la generación de residuos y una menor huella ambiental en comparación con los métodos convencionales de lixiviación de oro.

A pesar de las desventajas que presenta, desde que se descubrió, el cianuro no ha dejado de ser el lixiviante por excelencia del oro, esto es debido a su capacidad de disolver el oro de distintos tipos de

fuentes, las distintas técnicas para separar el oro de la solución y su amplio rango de operación lo mantienen como el lixiviante predilecto para el oro (Yu et al., 2020).

CONCLUSIONES

La búsqueda de información científica mediante herramientas de mapeo bibliográfico de libre uso es una novedosa manera de recopilar y comparar la información disponible en internet, ahorra una considerable cantidad de tiempo al introducirse a un tema nuevo y permite encontrar artículos de manera visual. Para la recopilación de información se puede optar por hacer mapas para cada subtema o ir mezclando los temas e ir formando un solo diagrama, para este review se realiza un mapa bibliográfico por cada uno de los lixiviantes de más relevancia actual y mediante las herramientas que ofrece el sitio se cotejan los enfoques de cada una de las líneas de investigación así como su impacto.

La búsqueda de alternativas continúa debido a la extrema toxicidad que presenta el proceso de cianuración y sus productos y a los muchos casos de accidentes medioambientales que están relacionados con la minería del oro.

Los haluros como el yodo; los compuestos derivados del azufre como la tiourea, el tiocianato y el tiosulfato; los compuestos orgánicos como la glicina y sistemas complejos como los solventes eutécticos profundos cumplen con los requisitos de lixiviación para el oro en mayor o menor medida, teniendo más relevancia actual a nivel de investigación e industrial los sistemas a base de tiosulfato. Aún con ello, el cianuro sigue y seguirá siendo el principal método de lixiviación de oro durante los próximos años y, probablemente, las siguientes décadas debido a su fácil implementación y rentabilidad. Por esto mismo, muchas de las investigaciones relacionadas con mitigar el impacto del cianuro continuarán siendo un tema central en la comunidad científica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Altinkaya, P., Wang, Z., Korolev, I., Hamuyuni, J., Haapalainen, M., Kolehmainen, E., Yliniemi, K., & Lundström, M. (2020). Leaching and recovery of gold from ore in cyanide-free glycine media. *Minerals Engineering*, 158, 106610. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106610>
- ASM International Handbook Committee. (1998). *Metals Handbook* (2a ed.). CRC Press. http://sme.vimaru.edu.vn/sites/sme.vimaru.edu.vn/files/volume_2_-_properties_and_selection_nonf.pdf

- Aylmore, M. G. (2016). Alternative lixivants to cyanide for leaching gold ores. En *Gold Ore Processing: Project Development and Operations* (Vol. 1, pp. 447–484). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00027-X>
- Aylmore, M. G., & Muir, D. M. (2001). Thiosulfate leaching of gold—a review. *Minerals Engineering*, 14(2), 135–174. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00172-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00172-2)
- Azizitorghabeh, A., Mahandra, H., Ramsay, J., & Ghahreman, A. (2021). Gold Leaching from an Oxide Ore Using Thiocyanate as a Lixiviant: Process Optimization and Kinetics. *ACS Omega*, 6(27), 17183–17193. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00525>
- Baloyi, N. P., Nseke, J. M., & Makhatha, M. E. (2022). Application of response surface methodology (RSM) for simultaneous optimization of kinetic parameters affecting gold leaching in thiosulfate based media: A statistical approach. *Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2022/8348167>
- Birich, A., Gao, Z., Vrucak, D., & Friedrich, B. (2023). Sensitivity of gold lixivants for metal impurities in leaching of RAM printed circuit boards. *Metals*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/met13050969>
- Borda, J., & Torres, R. (2022). Prospects for Thiourea as a Leaching Agent in Colombian Gold Small-Scale Mining: A Comprehensive Review. *Journal of Sustainable Mining*, 21(4), 298–308. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1364>
- Das, S., Natarajan, G., & Ting, Y. P. (2017). Bio-extraction of precious metals from urban solid waste. *AIP Conference Proceedings*, 1805. <https://doi.org/10.1063/1.4974410>
- Equipo de redaccion de Paperpile. (s/f). The top list of academic search engines. Paperpile. Recuperado el 7 de noviembre de 2023, de <https://paperpile.com/g/academic-search-engines/#faq>
- Faraji, F., Mahandra, H., & Ghahreman, A. (2022). Evaluation of different amino acids on growth and cyanide production by bacillus megaterium for gold recovery. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159639>
- Faraji, F., Wang, J., Mahandra, H., & Ghahreman, A. (2021). A green and dustainable process for the recovery of gold from low-grade sources using biogenic cyanide generated by bacillus

- megaterium: A comprehensive study. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(1), 236–245. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c06904>
- Garza-Román, M. R., Carrillo-Pedroza, F. R., Picazo-Rodríguez, N. G., Soria-Aguilar, M. de J., Almaguer-Guzmán, I., & Chaidez-Félix, J. (2021). Effects of pretreatment and leaching medium on the extraction efficiency of Au and Ag from a chalcopyrite leaching by-product. *DYNA (Colombia)*, 88(218), 119–126. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n218.90284>
- Han, Y., Yi, X., Wang, R., Huang, J., Chen, M., Sun, Z., Sun, S., & Shu, J. (2020). Copper extraction from waste printed circuit boards by glycine. *Separation and Purification Technology*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117463>
- Hilario-Mallma, C. M., & Ramos-Coronado, J. J. (2020). Cinética electroquímica de reactivos alternativos al cianuro en la lixiviación del oro en la planta de lixiviación de Laytaruma [Tesis de Licenciatura]. Universidad nacional del centro del Perú.
- Ippolito, N. M., Birloaga, I., Ferella, F., Centofanti, M., & Vegliò, F. (2021). Preliminary study on gold recovery from high grade e-waste by thiourea leaching and electrowinning. *Minerals*, 11(3), 1–16. <https://doi.org/10.3390/min11030235>
- Jamett, I., Carrasco, P., Olmos, M., & Hernández, P. (2023). Glycine/glutamate: “Green” alternatives to recover metals from minerals/residues—Review of current research. *Minerals*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/min13010022>
- Jenkin, G. R. T., Al-Bassam, A. Z. M., Harris, R. C., Abbott, A. P., Smith, D. J., Holwell, D. A., Chapman, R. J., & Stanley, C. J. (2016). The application of deep eutectic solvent ionic liquids for environmentally-friendly dissolution and recovery of precious metals. *Minerals Engineering*, 87, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.026>
- Jeon, S., Bright, S., Park, I., Kuze, A., Ito, M., & Hiroyoshi, N. (2022). A Kinetic Study on Enhanced Cementation of Gold Ions by Galvanic Interactions between Aluminum (Al) as an Electron Donor and Activated Carbon (AC) as an Electron Mediator in Ammonium Thiosulfate System. *Minerals*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/min12010091>
- Jorjani, E., & Askari, H. (2022). Gold leaching from ores using biogenic lixivants – A review. *Current Research in Biotechnology*, 4, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2021.12.003>

- Keskinen, S. (2013). Comparison of cyanide and thiosulphate leaching for gold production (a literature review) [Tesis de Licenciatura, Lappeenranta University of Technology]. En lutpub.lut.fi. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/94208/Comparison%20of%20Cyanide%20and%20Thiosulphate%20Leaching%20for%20Gold%20Production.pdf?sequence=2>
- Konyratbekova, S. S., Baikonurova, A., & Akcil, A. (2014). Non-cyanide leaching processes in gold hydrometallurgy and iodine-iodide applications: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(3), 198–212. <https://doi.org/10.1080/08827508.2014.942813>
- La Brooy, S. R., Linge, H. G., Walker, G. S., & Parker, A. J. (1994). Review of gold extraction from ores. *Minerals Engineering*, 7(10), 1213–1241. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)90114-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)90114-7)
- Le, G., Li, W. J., Song, K., Song, Y. S., Chen, Y., Bai, A. P., & Cheng, Y. (2022). Electrochemical dissolution behavior of gold and its main coexistent sulfide minerals in acid thiocyanate solutions. *Rare Metals*, 41(1), 254–261. <https://doi.org/10.1007/s12598-020-01614-y>
- Li, H., Yin, S., Li, S., Zhang, L., Peng, J., & Yang, K. (2021). Investigation on the recovery of gold from pretreated cyanide tailings using chlorination leaching process. *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 56(1), 45–53. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1708108>
- Li, J., & Miller, J. D. (2006). A review of gold leaching in acid thiourea solutions. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 27(3), 177–214. <https://doi.org/10.1080/08827500500339315>
- Liu, Z. wei, Guo, X. yi, Tian, Q. hua, & Zhang, L. (2022). A systematic review of gold extraction: Fundamentals, advancements, and challenges toward alternative lixiviants. *Journal of Hazardous Materials*, 440. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129778>
- Logsdon, M. J., Hagelstein, Karen., Mudder, Terry., & International Council on Metals and the Environment. (1999). The management of cyanide in gold extraction. International Council on Metals and the Environment.
- Manzila, A. N., Moyo, T., & Petersen, J. (2022). A study on the applicability of agitated cyanide leaching and thiosulphate leaching for gold extraction in artisanal and small-scale gold mining. *Minerals*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/min12101291>

- Marsden, J. O., & House, C. (2006). *The chemistry of gold extraction* (2a ed.). Society for mining metallurgy, and exploration, Inc.
- Medina, D., & Anderson, C. G. (2020). A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates. *Metals*, 10(7), 1–11. <https://doi.org/10.3390/met10070897>
- Moreno-Cedillos, J. G., Carillo-Pedroza, F. R., & Soria-Aguilar, M. J. (2022, octubre). Extracción de Au en un sistema halógeno-halogenuro (I2-I). *Geomimet*, 7–11.
- Munganyinka, J. P., Habinshuti, J. B., Komadja, G. C., Uwamungu, P., Tanvar, H., Ofori-Sarpong, G., Mishra, B., Onwualu, A. P., & Shuey, S. (2022). Optimization of Gold Dissolution Parameters in Acidified Thiourea Leaching Solution with Hydrogen Peroxide as an Oxidant: Implications of Roasting Pretreatment Technology. *Metals*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/met12101567>
- Munive, G. T., Encinas, M. A., Salazar Campoy, M. M., Álvarez, V. E., Vazquez, V. M., & Choque, D. C. (2020). Leaching Gold and Silver with an Alternative System: Glycine and Thiosulfate from Mineral Tailings. *JOM*, 72(2), 918–924. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03652-z>
- Noroña Alarcón, C., Noroña Alarcón, J., & Paladines Rodríguez, J. (2019). Análisis de la exportación de los desechos electrónicos y su incidencia en el comercio exterior del ecuador. *Espirales revista multidisciplinaria de investigación científica*.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=573263325004>
- Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2015). The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine-peroxide solutions and their adsorption on carbon. *Hydrometallurgy*, 152, 199–203. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.12.015>
- Oraby, E. A., Eksteen, J. J., Karrech, A., & Attar, M. (2019). Gold extraction from paleochannel ores using an aerated alkaline glycine lixiviant for consideration in heap and in-situ leaching applications. Elsevier.
- Picazo-Rodríguez, N., Carrillo-Pedroza, F., Martínez-Luévanos, A., Soria-Aguilar, M., Almaguer-Guzmán, I., & Garza-Roman, M. (2022). Recuperación de oro y plata de los insolubles y productos de la lixiviación directa usando cianuración-glicina. XX Encuentro Sobre Procesamiento de Minerales.

<https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/8028/PonenciaIM.2022.Recuperaci%C3%B3n.Carrillo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Picazo-Rodríguez, N. G., Carrillo-Pedroza, F. R., Soria-Aguilar, M. D. J., Guzmán, I. A., & Luévanos, A. M. (2022). Análisis de la cianuración convencional y asistida con glicina de un residuo procedente de la lixiviación directa de esfalerita. Instituto de Metalurgia UASLP.

<https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/bitstream/handle/i/8052/Ponencia.IM.2022.An%C3%A1lisis.Carrillo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ponghiran, W., Charoensaeng, A., & Khaodhiar, S. (2021). The environmental impact assessment of gold extraction processes for discarded computer RAM: a comparative study of two leaching chemicals. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(4), 1412–1422.

<https://doi.org/10.1007/s10163-021-01221-8>

Pourbaix, M. (1974). *Atlas of Electrochemical Equilibria in-Aqueous Solutions* (2a ed.). National Association of Corrosion Engineers.

Ray, D. A., Baniasadi, M., Graves, J. E., Greenwood, A., & Farnaud, S. (2022). Thiourea Leaching: An Update on a Sustainable Approach for Gold Recovery from E-waste. En *Journal of Sustainable Metallurgy* (Vol. 8, Número 2, pp. 597–612). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00499-8>

Rezaee, M., Abdollahi, H., Saneie, R., Mohammadzadeh, A., Rezaei, A., Karimi Darvanjooghi, M. H., Brar, S. K., & Magdouli, S. (2022). A cleaner approach for high-efficiency regeneration of base and precious metals from waste printed circuit boards through stepwise oxido-acidic and thiocyanate leaching. *Chemosphere*, 298.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134283>

Rizki, I. N., Tanaka, Y., & Okibe, N. (2019). Thiourea bioleaching for gold recycling from e-waste. *Waste Management*, 84(84), 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.021>

Sánchez, J., Segundo, S., González, E. J., & González, M. (2019). Formación y caracterización de disolventes eutécticos profundos: Aplicación a la extracción de moléculas de interés [Tesis de Licenciatura]. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

- Soltani, F., Marzban, M., Darabi, H., Aazami, M., & Hemmati Chegeni, M. (2020). Effect of Oxidative Pretreatment and Lead Nitrate Addition on the Cyanidation of Refractory Gold Ore. *JOM*, 72(2), 774–781. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03859-0>
- Ubal dini, S., Fornari, P., Massidda, R., & Abbruzzese, C. (1998). An innovative thiourea gold leaching process. *Hydrometallurgy*, 48, 113–124.
- Wang, J., Xie, F., Wang, W., Bai, Y., Fu, Y., & Chang, Y. (2020). Leaching of gold from a free milling gold ore in copper-citrate-thiosulfate solutions at elevated temperatures. *Minerals Engineering*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106476>
- Weishuhn, M. (2023). Inciteful. Inciteful: Citation network exploration. <https://inciteful.xyz>
- Xie, F., Chen, J. nan, Wang, J., & Wan, W. (2021). Review of gold leaching in thiosulfate-based solutions. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 31(11), 3506–3529. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65745-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65745-X)
- Xiong, Q., Jiang, S., Fang, R., Chen, L., Liu, S., Liu, Y., Yin, S., Hou, H., & Wu, X. (2021). An environmental-friendly approach to remove cyanide in gold smelting pulp by chlorination aided and corncob biochar: Performance and mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, 408. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124465>
- Xu, B., Li, K., Li, Q., Yang, Y., Liu, X., & Jiang, T. (2019). Kinetic studies of gold leaching from a gold concentrate calcine by thiosulfate with cobalt-ammonia catalysis and gold recovery by resin adsorption from its pregnant solution. *Separation and Purification Technology*, 213, 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.064>
- Yu, S., Yu, T., Song, W., Yu, X., Qiao, J., Wang, W., Dong, H., Wu, Z., Dai, L., & Li, T. (2020). Ultrasound-assisted cyanide extraction of gold from gold concentrate at low temperature. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105039>
- Zupanc, A., Heliövaara, E., Moslova, K., Eronen, A., Kemell, M., Podlipnik, Č., Jereb, M., & Repo, T. (2022). Iodine-Catalysed Dissolution of Elemental Gold in Ethanol. *Angewandte Chemie - International Edition*, 61(14). <https://doi.org/10.1002/anie.202117587>